



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPACTACIÓN
INTELIGENTE DE SUELOS**

TESIS

Que para obtener el título de

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A

ARCADIO LÓPEZ MEZA

DIRECTOR DE TESIS

ING. ALEJANDRO PONCE SERRANO



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIA

A la memoria de mis padres:

Honorio López Martínez y

Delia Meza Valera.

Por haber sido la base de mi educación y apoyo incondicional en cada momento de mi vida, y así poder seguir adelante cada día con mayor esfuerzo y energía.

A mis tíos:

Cornelio Álvarez Quintanar y

Romualda Trigos Martínez

A Irene Álvarez Trigos.

Por sus consejos y orientación que me fueron de mucha valía al momento de elegir el camino.

A la memoria de mis amigos:

Ing. José Enrique Vilchis García e

Ing. Germán Vázquez Díaz.

Por su gran amistad y confianza.

AGRADECIMIENTOS

A mis hermanos:

Arturo López Meza y

Carmen López Meza

Gracias por su apoyo que me brindaron para salir adelante con mis estudios profesionales.

A mis amigos:

Ing. Eladio Enrique Cabrales Quezada

Ing. Fortino de Jesús Santos Neri

Gracias por su valiosa ayuda moral y material y por haberme apoyado a superar etapas difíciles en mi formación profesional.

A mi director de tesis:

Ing. Alejandro Ponce Serrano

Por su atención y motivación en la elaboración de éste trabajo. Gracias.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. En especial a la División de Ingeniería Civil y Geomática que me permitió ser parte de esta Honorable Institución. Gracias.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
I. FUNDAMENTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS	3
I.1 DEFINICIÓN.....	3
I.2 PRUEBAS DE COMPACTACIÓN DE LABORATORIO.....	7
I.3 PRUEBA DE COMPACTACIÓN ESTANDAR	11
I.4 PRUEBA DE COMPACTACIÓN MODIFICADA.....	14
I.5 FACTORES QUE AFECTAN LA COMPACTACIÓN	18
I.6 COMPACTACIÓN VIBRATORIA	22
I.7 COMPACTACIÓN OSCILATORIA.....	25
II. COMPACTACIÓN INTELIGENTE	28
II.1 DEFINICIÓN.....	28
II.2 CONTEXTO HISTÓRICO	30
II.3 FUNCIONAMIENTO	40
II.4 BENEFICIOS.....	42
III. EQUIPOS DE COMPACTACIÓN INTELIGENTE	45
III.1 COMPACTADORES HAMM.....	45
III.2 BOMAG	50
III.3 SAKAI	54
III.4 DYNAPAC.....	57
III.5 AMMANN	61
III.6 CATERPILLAR (CAT)	66
IV. CONTROL DE CALIDAD DE LA COMPACTACIÓN INTELIGENTE	72
IV.1 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA	72
IV.2 EQUIPOS CON POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)	77
IV.3 ACTUALIDAD.....	80
IV.4 PRUEBAS IN SITU	82
V. CONCLUSIONES	87
BIBLIOGRAFÍA	90

INTRODUCCIÓN

En esta tesis se describen las características y beneficios esenciales que se obtienen cuando se aplica la Tecnología de Compactación Inteligente (Intelligent soil Compaction, **IC**), en los procesos de compactación de suelos, y mezclas asfálticas.

La compactación de suelos ha figurado entre las técnicas de construcción desde épocas muy remotas, si bien en la antigüedad su aplicación no era general ni sistemática el método utilizado fue el de apisonado por medio de animales o personas. Después utilizando rodillos de piedra o madera los cuales eran arrastrados por hombres o animales; como lo menciona la historia de los romanos que iniciaron la compactación de los materiales de sus caminos con esclavos, que los hacían jalar grandes cilindros de roca para compactar el suelo, en la construcción de las calzadas en Italia, pero también en Mesoamérica los mayas en la construcción de sus “caminos blancos” o sacbe’ob. Hasta que apareció el compactador de vapor y posteriormente la máquina de combustión interna de diesel. Las técnicas de compactación se aplican a rellenos artificiales, tales como cortinas para presas de tierra, diques, terraplenes para caminos y ferrocarriles, pistas de aeropuertos, bordos de defensa, muelles y pavimentos asfálticos; la compactación es y será uno de los procesos más importantes en la construcción de carreteras. La calidad en cualquier proceso de compactación depende de varios factores y para poder analizar la influencia particular de cada uno se requiere disponer de procedimientos estandarizados que reproduzcan los procesos de compactación de campo en laboratorio, en forma representativa. De esta manera al aplicar el sistema convencional de compactación, las pruebas de compactación de laboratorio pasan a primer plano en el control de calidad de los trabajos. Pero para poder entender la acción de la compactación de un rodillo estático.

En 1885 el francés Joseph Valentín Boussinesq desarrollo una expresión matemática para obtener el incremento de esfuerzo en una masa semi-infinita de suelo debido a la aplicación de una carga puntual en su superficie (Teoría de Boussinesq). Luego con base en una serie de pruebas de laboratorio, en 1933 Ralph Proctor estableció una correlación entre los resultados de un proceso de compactación y el aumento del peso volumétrico seco del material compactado, como resultado se tienen las **Pruebas Proctor**, que posteriormente son estandarizadas por la American Association of State Highway and Transportation of Officials, **AASHTO**, (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes). Pero actualmente hay una gran variedad de equipos de compactación, en diferentes marcas y modelos, los cuales por la energía de compactación que generan se han clasificado de la siguiente manera: rodillos metálicos, rodillos neumáticos (de llantas grandes y pequeñas), rodillos pata de cabra, rodillos de reja, rodillos de impacto, rodillos vibratorios, rodillos pata de cabra vibratoria y, rodillos en tándem vibratorio/oscilatorio.

La tecnología actual está desarrollando un gran número de equipos en los que se busca combinar los efectos de dos o más de los sistemas tradicionales, a fin de lograr una especialización de las acciones que garanticen un resultado óptimo para cada caso particular de compactación; de esta manera aparece el concepto de Compactación Inteligente de Suelos, que en México es un concepto poco o nada conocido, pero en algunos países Europeos esta tecnología inició hace más de 30 años como una técnica en la construcción de carreteras. Esta técnica luego se extendió a campos más amplios de la ingeniería, incluyendo las grandes autopistas, ferrocarriles, pistas de aeropuertos, presas, rellenos sanitarios, cimentación de estructuras y edificios.

Es importante destacar que esta tecnología es más avanzada midiendo la rigidez, no la densidad, porque la medición de la rigidez de la capa compactada se acepta como un mejor indicador que la densidad en los proyectos de compactación de suelos.

I. FUNDAMENTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS

I.1 DEFINICIÓN

La compactación se define como el proceso mecánico de densificación del suelo a través del reacomodo de partículas y reducción de vacíos, por la expulsión de aire y/o agua, mediante este proceso se mejoran las características y propiedades fundamentales del material.

El objetivo principal de la compactación es obtener un suelo más estructurado de manera que tenga un comportamiento mecánico adecuado a lo largo de la vida útil de la obra, que sea capaz de soportar cargas mayores sin sufrir deformaciones apreciables o significativas.

Un suelo, en el sentido ingenieril, es un aglomerado relativamente poco cohesivo compuesto por minerales, materia orgánica y/o sedimentos que se encuentra por encima de un substrato rocoso. (Fig.I.1.1).

La textura de un suelo se relaciona con su aspecto o “tacto” y depende del tamaño relativo y la forma de las partículas que lo constituyen. También es función de los rangos de distribución de los distintos tamaños. Entre los suelos de grano grueso están las **gravas** y las **arenas**, los suelos de grano fino son considerados el **limo** y la **arcilla**. Luego entonces alguien los ha definido y clasificado, así tenemos el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Unified Soil Classification System, **USCS**.) y el sistema de la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (American Association of State Highway and Transportation Officials, **AASHTO**).

El **USCS** cubre los suelos gruesos y los finos, distinguiendo ambos por el cribado a través de la malla 200 (0.074 mm). El tamiz No. 200 se considera la malla más fina y establece el límite entre suelos gruesos y suelos finos. Un suelo se considera grueso si más del 50% de sus partículas son gruesas, y fino; si más de la mitad de sus partículas, en peso, son finas. En el caso de los suelos **GRUESOS** este sistema simboliza a cada grupo el cual está formado por dos letras mayúsculas que son las iniciales de los nombres en inglés de los suelos típicos de este grupo.

G (Gravel) Gravas y suelos en que predominen éstas.

S (Sand) Arenas y suelos arenosos.

C (Clay) Arcilla inorgánica, material con cantidad apreciable de finos plásticos, formando a los grupos **GC** y **SC**.

Las gravas y las arenas se separan con la malla No.4 (4.75 mm), de manera que un suelo pertenece al grupo genérico **G**, si más del 50% de su fracción gruesa (retenida en la malla 200) no pasa la malla No.4, y es del grupo genérico **S**, en caso contrario.

GW: Gravas bien clasificadas, mezclas de grava/arena, sin o con pocos finos.

GP: Gravas mal clasificadas, mezclas de grava/arena, sin o con pocos finos.

GM: Gravas carbonatadas grises, mezclas de limo/arena.

GC: Mezcla de gravas carbonatadas grises/arena/arcilla.

SW: Arenas bien clasificadas, arenas con grava, sin o con pocos finos.

SP: Arenas mal clasificadas, arenas con grava, sin o con pocos finos.

SM: Arenas limosas, mezclas limo/arena.

SC: Arenas arcillosas, mezclas arena/arcilla.

Los materiales o suelos **FINOS** también están agrupados, formando el símbolo de cada grupo por dos letras mayúsculas, dando lugar a la siguiente clasificación:

M (del Sueco Mo y Mjala) Limos inorgánicos.

C (Clay) Arcillas inorgánicas.

O (Organic) Limos y Arcillas Orgánicas.

Cada tipo de suelo se subdivide, según su límite líquido, en dos grupos. Si este es menor del 50% son suelos de compresibilidad baja o media, se agrega al símbolo genérico la letra **L** (Low Compressibility), arcillas de baja compresibilidad. Los suelos finos con límite líquido mayor del 50% llevan tras el símbolo genérico la letra **H** (High Compressibility), arcillas de alta compresibilidad.

ML: Limos inorgánicos y arenas muy finas, arena fina limo-arcillosa.

CL: Arcillas inorgánica de plasticidad baja a media, arcillas arenosas, limosas o sueltas.

OL: Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.

MH: Limos inorgánicos, arenas micáceos o de diatomeas finas, limos elásticos.

CH: Arcillas grasas.

OH: Arcillas orgánicas grasas.

PT: Turba, humus, y otros suelos orgánicos pantanosos.

SP- SM: Mezclas de limo/arena/grava.

L: Calizas.

S: Areniscas.

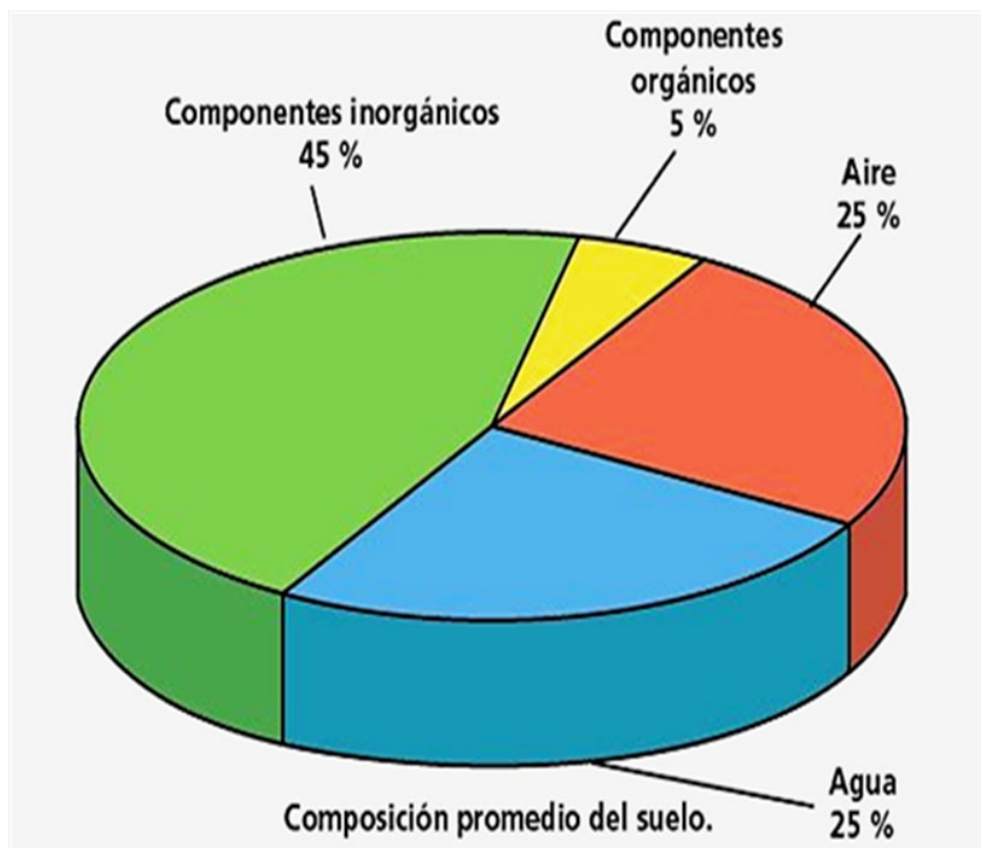


Fig. I.1.1 Porcentajes en el contenido de un suelo.

Como ya se mencionó anteriormente la compactación es un proceso mecánico mediante el cual se logra la densificación del suelo al reducirse los espacios vacíos por la expulsión de aire y/o agua contenido en ellos, logrando un mejor acomodo de las partículas a través de la aplicación de una determinada carga logrando un mayor peso por unidad de volumen, con lo cual se logra reducir los futuros asentamientos bajo cargas de trabajo. En otras palabras, la compactación de los suelos es el mejoramiento artificial de sus propiedades mecánicas como la resistencia al corte, la compresibilidad y su relación esfuerzo de formación.

La principal característica para clasificar un suelo como compactable es la composición por tamaños (granulometría) de las partículas que integran los materiales empleados para terracerías, mediante su paso por una serie de mallas con aberturas determinadas. En las obras viales, los materiales que se utilizan en la construcción de la capa subrasante puede ser:

- I. Arenas (**SW, SP**).
- II. Arenas Arcillosas (**SC**).
- III. Arenas Limosas (**SM**).
- IV. Limos de baja plasticidad (**ML**).
- V. Arenas con grava, arena arcillosa (**GC**).

En todo caso el principal objetivo y razón de una compactación, es obtener un suelo de tal manera estructurado que posea y mantenga un comportamiento mecánico adecuado a través de toda la vida útil de la obra.

I.2 PRUEBAS DE COMPACTACIÓN DE LABORATORIO

En la compactación de suelos se ha hecho indispensable el uso de técnicas de laboratorio que permitan mejorar suelos compactados, mediante sus propiedades para fines de proyecto. Con estas pruebas se plantea la necesidad de obtener congruencia entre los resultados obtenidos en laboratorio y los que finalmente pueden obtenerse en la obra, en todo caso, las técnicas utilizadas en el laboratorio para compactar suelos tratan de reproducir en lo posible los efectos de los compactadores de campo, ya que los requisitos que se tendrán en la compactación en campo tienen que basarse sobre un peso volumétrico seco de proyecto, que se obtiene en laboratorio.

Hay varios tipos de pruebas para estudiar las propiedades de los suelos. Para medir la resistencia, la compresibilidad, deformabilidad, la relación esfuerzo-deformación, la permeabilidad, susceptibilidad al agrietamiento o la flexibilidad de los suelos; se requieren pruebas relativamente especializadas y costosas. Entre las propiedades fundamentales el peso volumétrico seco a que llega el material compactado es la propiedad más importante para controlar un proceso de compactación que avance de manera adecuada. Debido a la importancia de la compactación de suelos, se han desarrollado procedimientos estándar en laboratorio, estos generalmente implican la compactación del suelo en un molde con diversos contenidos de humedad. Luego, los resultados se representan en una gráfica, Peso Volumétrico Seco - Contenido de Humedad. (Fig.I.2.1).

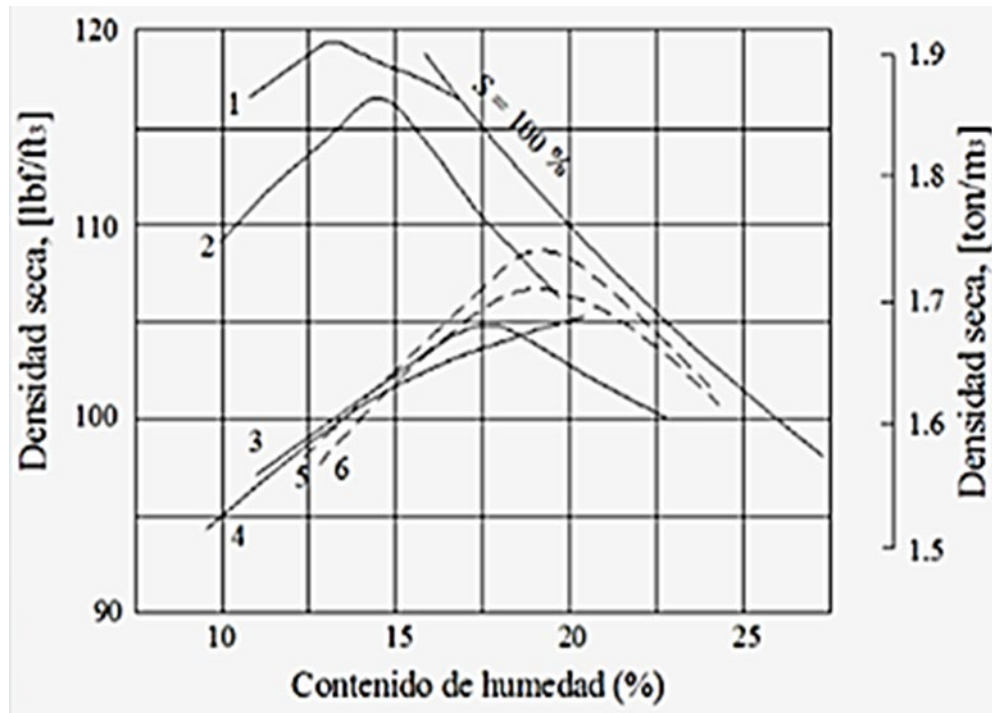


Fig. I.2.1. Contenido de humedad - Peso volumétrico seco.

Los estudios muestran pruebas de laboratorio como base para proyecto y fuente de información para planear un adecuado modo de trabajo en campo, solo se justifican en términos de representatividad de los procesos de campo que se producen. Puede haber otro uso para las pruebas de compactación, para tener un estricto control de calidad, en este caso las pruebas funcionan fundamentalmente como un índice comparativo de pesos volumétricos de laboratorio y de campo.

Existen muchos métodos de compactar suelos en campo, por lo tanto es lógico pensar que no se tendrá una sola prueba con una sola técnica estandarizada, que sea para representarlos a todos. La mayoría de las pruebas de compactación por impacto tiene las siguientes características: El suelo se compacta por capas en el interior de un molde cilíndrico metálico, variando de unas pruebas a otras el tamaño del molde y el espesor de capa.

En todos los casos la compactación se logra al aplicar a cada capa dentro del molde un cierto número de golpes uniformemente distribuidos, con un pisón cuyo peso, dimensiones y altura de caída cambian de unas pruebas a otras. El número de golpes del pisón que se aplica por capa también cambia en las diferentes pruebas. Algunas de las pruebas por impacto que han alcanzado mayor difusión son las pruebas **Proctor Normal**, y la **Proctor Modificada**. Pero uno de los problemas más serios de las pruebas de compactación por impacto estriba en que su representatividad se ve afectada por las condiciones de confinamiento muy rígidas que impone el molde al suelo colocado en su interior, la posibilidad de desplazamiento de las partículas del suelo, haciéndolas distintas de las que se tiene en campo. En los procesos de compactación, se puede obtener para un mismo suelo grandes diferencias, tanto en peso volumétrico seco máximo como en contenido óptimo de agua, al aplicar diferentes métodos de compactación. Para alcanzar los objetivos en las pruebas de laboratorio que se realicen para determinar las características de calidad de los materiales, estas se ejecutaran conforme a lo indicado en los manuales del libro Métodos de Muestreo y Prueba de Materiales (**MMP**), de la Normativa para la Infraestructura del Transporte.

La Normativa para la Infraestructura del Transporte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (**NIT-SCT**) utiliza tres tipos de publicaciones denominadas: Normas(**N**), Manuales (**M**) y prácticas recomendables (**R**).

Las Normas(**N**): proponen valores específicos para diseño, las características y la calidad, de los materiales y equipos de instalación permanente, así como las tolerancias en los acabados; los métodos generales de ejecución, medición y base de pago de los diversos conceptos de obra y en general, todos aquellos aspectos que se puedan convertir en especificaciones al incluirse en el proyecto.

Los Manuales (**M**): contienen el compendio de los métodos y procedimientos para la realización de todas las actividades relacionadas con la infraestructura del transporte.

Las Prácticas Recomendables(**R**): proponen y explican el establecimiento de criterios y la aplicabilidad de teorías a casos específicos, de manera que el usuario tenga elementos para seleccionar los métodos o procedimientos de entre los contenidos en los manuales.

Entonces, para tener una idea clara de cómo realizar una prueba Proctor es necesario aplicar las siguientes normas y manuales:

I.	Materiales para terraplén	N-CMT -1-01
II.	Materiales para subyacente	N-CMT -1-02
III.	Materiales para subrasante	N-CMT -1-03
IV.	Muestreo de materiales para terracería	M-MMP-1-01
V.	Secado, disgregado y cuarteado de muestras	M-MMP-1-03
VI.	Contenido de agua	M-MMP-1-04
VII.	Densidades relativas y absorción	M-MMP-1-05
VIII.	Granulometría de materiales compactables para terracerías	M-MMP-1-06

El equipo para la ejecución de las pruebas estará en condiciones de operación, calibrado, limpio y completo en todas sus partes. Todos los materiales a emplear serán de alta calidad.

I.3 PRUEBA DE COMPACTACIÓN ESTANDAR

La prueba de compactación **Proctor** es un método estandarizado para evaluar la densidad del suelo en función de su porcentaje de humedad óptimo. Ralph R. **Proctor** en 1933, estableció una correspondencia entre el peso volumétrico seco del suelo compactado y su resistencia, con el mismo procedimiento se realizan varias pruebas, variando el contenido de humedad de la muestra obteniendo dos datos muy importantes, con estos datos se construye la curva de compactación correspondiente a diferentes densidades de suelo alcanzados a diferentes contenidos de agua. Esta curva se emplea en campo para controlar el proceso de compactación. Durante la compactación en campo, se espera que el contenido de humedad del suelo se encuentre lo más cerca posible al valor que proporciona la mayor densidad.

En mecánica de suelos, la prueba de compactación **Proctor Estándar** es una de las más importantes técnicas de estudio para el control de calidad de la compactación de un suelo. Existen dos tipos de pruebas Proctor normalizadas; la "**Prueba Proctor Normal**", y la "**Prueba Proctor Modificada**" (Fig.I.3.1).

La diferencia entre ambas radica en la distinta energía utilizada, debido al mayor peso del pisón y mayor altura de caída en la Proctor Modificada.



Fig. I.3.1 Moldes y martillos para las pruebas de laboratorio Proctor.

Proctor Normal. Se toma una muestra representativa del suelo a compactar, de humedad conocida. El suelo se compacta en un molde en 3 capas iguales, recibiendo cada capa 25 o 56 golpes de un martillo de 2.5 kg de peso, dependiendo si se utiliza el molde pequeño, el de 4" de diámetro por 4 ½" de altura (suelo retenido en la malla de 9.5 mm (3/8"), es menos del 20% en peso), o el molde grande el de 6" de diámetro (suelo retenido en la malla de 9.5 mm es más del 20% en peso y suelo retenido en la malla de 19 mm (3/4"), es menos del 30% en peso).

Las especificaciones hablan de cumplir un porcentaje del Peso Volumétrico Seco Máximo Proctor (**PVSMP**) que generalmente es del 90% ó del 95%, por lo tanto los resultados de la prueba de compactación de campo no se dan en peso volumétrico de la capa compactada sino en porcentaje de compactación.

Por ejemplo, si el **PVSMP** de un suelo obtenido en laboratorio es de 1810 kg/m³, y el proyecto marca 95%, entonces el peso volumétrico mínimo a alcanzar en el campo sería: $1810 \times 0.95 = 1720 \text{ kg/m}^3$.

Este es el tan anhelado parámetro a obtener en campo (in situ), llamado formalmente **Grado de Compactación**.

Las dimensiones importantes a considerar son las siguientes:

Diámetro del cilindro. (mm.)	Peso del martillo. (Kg.)	Diámetro del martillo. (mm.)	Altura de caída del martillo. (mm.)
101.6 o 152.4	2.5	50.8	305

I.4 PRUEBA DE COMPACTACIÓN MODIFICADA.

Debido a los beneficios de la compactación, los Ingenieros y contratistas han adquirido grandes y pesadas máquinas para aumentar el área y la profundidad de compactación de la capa del suelo y consecuentemente el rendimiento en obra. En el transcurso del tiempo y haber estandarizado la prueba **Proctor**, esta no pudo reproducir las densidades medidas en el campo, esto dio origen al desarrollo de la prueba de compactación **Proctor Modificada**. (Fig.I.4.1 y I.4.2). Igual que en la prueba Proctor Normal, la **Proctor Modificada** permite determinar la densidad que puede alcanzar el suelo en función del contenido de agua. En esta prueba se tiene en cuenta el elevado trabajo de compactación de la maquinaria empleada, ya que aplica una energía de compactación 4.5 veces mayor a la aplicada en la prueba Proctor Normal.

El procedimiento y el equipo son esencialmente los mismos que los utilizados para la prueba normal, excepto que se debe compactar en 5 capas. Si el material tiene menos del 20% de gravas mayores a 9.5 mm (3/8"), se utiliza el molde pequeño (4" de diámetro) y se aplican 25 golpes por capa, si tiene más del 20% de gravas mayores a 9.5 mm y menos del 30% de gravas mayores a 19 mm (3/4"), se utiliza el molde grande (6" de diámetro) y se aplican 56 golpes por capa, proporcionando un mayor esfuerzo de compactación, se utiliza un martillo más pesado y con una mayor altura de caída.

Para esta prueba, las dimensiones importantes son las siguientes:

Diámetro del cilindro. (mm.)	Peso del martillo (Kg.)	Diámetro del martillo. (mm.)	Altura de caída del martillo. (mm.)
101.6 o 152.4	4.5	50.8	458

Esta práctica se aplica sólo para suelos que tienen 30% o menos en peso de sus partículas retenidas en la malla de 3/4" (19 mm).

Se determina el Peso Unitario Seco resultante.

El procedimiento se repite con un número suficiente de contenidos de agua para establecer la relación entre Peso Unitario Seco y el Contenido de Agua del Suelo. Estos datos, se representan en una gráfica conocida como Curva de Compactación. El valor Óptimo de Contenido de Agua y Máximo Peso Unitario Seco Modificado se determina de la curva de compactación.

Para esta práctica se tienen 3 métodos alternativos:

MÉTODO “A”

Uso, cuando el 20% o menos del peso del material es retenido en la malla N° 4 (4.75 mm).

Material, se emplea el que pasa por la malla N° 4, (4.75 mm).

Diámetro del Cilindro (mm.)	Número de capas	Golpes por capa
101.6	5	25

Otros usos, si el método no es especificado; la elección se basará en la gradación del material, pueden hacerse las pruebas usando el método B ó C.

MÉTODO “B”

Uso, cuando más del 20% del peso del material es retenido en la malla N° 4 (4.75 mm), y 20% o menos de peso del material es retenido en la malla 3/8”, (9.5 mm).

Material, se emplea el que pasa por la malla de 3/8”, (9.5 mm).

Diámetro del cilindro (mm.)	Número de capas	Golpes por capa
101.6	5	25

Si el método no es especificado, y los materiales entran en los requerimientos de gradación pueden hacerse las pruebas usando el Método C.

MÉTODO "C"

Uso, cuando más del 20% en peso del material se retiene en la malla 3/8" (9.5 mm) y menos de 30% en peso es retenido en la malla 3/4" (19 mm).

Material, se emplea el que pasa por la malla 3/4" (19 mm).

Diámetro del cilindro (mm.)	Número de capas	Golpes por capa
152.4	5	56

El molde de 6" de diámetro no será usado con los métodos A o B.



Fig. I.4.1 Cilindros metálicos para la prueba Proctor de laboratorio.



Fig.I.4.2 Prueba Proctor en laboratorio

I.5 FACTORES QUE AFECTAN LA COMPACTACIÓN

Son diversos los factores que se deben tener en cuenta para lograr una compactación óptima ya que un suelo puede compactarse de diferentes maneras y en cada caso se obtendrá un resultado diferente.

Entre los principales factores que afectan la compactación están:

- a) **El contenido del agua.** Proctor afirmó que el contenido de agua del suelo que se compacta es una variable fundamental del proceso. Proctor puso de manifiesto que para un suelo dado y utilizando un determinado proceso de compactación, existe un contenido de agua de compactación, llamado el óptimo, que es el que produce el máximo peso volumétrico seco que se debe de obtener con ese procedimiento de compactación. En un procedimiento de compactación de campo, dicho contenido de agua es el óptimo que se debe utilizar para el equipo y energía correspondiente. La falta de humedad exige mayor esfuerzo de compactación, así como también lo exigirá un exceso de la misma.

- b) **El tipo de suelo a compactar.** La naturaleza del suelo con que se trabaja influye de manera muy importante en el proceso de compactación. De acuerdo a la clasificación de los suelos prevalece la diferencia entre suelos finos y gruesos o entre suelos arcillosos y fricciantes (granulometría del material). Ya que la compactación de los suelos se produce por la reorientación de las partículas. La forma de las partículas también tiene importancia en la compactación, los materiales con partículas de forma angulosa son generalmente más compactables que partículas con formas redondeadas.

- c) **La energía de compactación.** Se entiende por energía específica de compactación la que se entrega al suelo por unidad de volumen, durante un proceso mecánico. El concepto de energía específica conserva su valor cuando se relaciona con sus procedimientos de compactación de campo.

En el caso de un rodillo la energía específica depende principalmente de la presión y el área de contacto entre el rodillo y el suelo, del espesor de capa que se vaya a compactar y el número de pasadas del equipo.

- d) **Condiciones climáticas y ambientales.** La temperatura ejerce un papel importante en los procesos de compactación de campo, por el efecto de evaporación del agua suministrada al suelo en campo y la condensación de la humedad en el ambiente.
- e) **Número de pasadas.** El número de pasadas que un equipo de compactación deberá dar sobre un determinado material lo definen los siguientes elementos:
- i. Tipo de compactador.
 - ii. Tipo de material.
 - iii. Contenido de humedad o en su caso la temperatura en pavimentos de asfalto.
 - iv. Forma en que se aplica la presión al material.
- f) **Las curvas de compactación obtenidas en laboratorio.** Con las pruebas de laboratorio Proctor se demuestra una correlación entre la humedad y el peso volumétrico seco de un suelo, y el peso volumétrico seco tiende a crecer a medida que se incrementa la humedad al suelo; hasta llegar a un cierto valor óptimo, después del cual el peso volumétrico seco empieza a disminuir.(Fig. I.5.1).Así de esta manera, con un método de compactación de laboratorio cualquiera, utilizando varias muestras del mismo suelo con diversos contenidos de agua se obtiene un par de valores: humedad (ω), y el peso volumétrico seco (γ_d) para trazar la gráfica o curva de compactación, donde en el eje de las abscisas están las humedades ω en (%), y en el eje de las ordenadas los pesos volumétricos secos (γ_d) en ton/m³. (Fig.I.5.2.).

El peso volumétrico seco corresponde al máximo valor de la curva, se llama peso volumétrico seco máximo del laboratorio $(\gamma_d)_{máx}$.

La humedad que corresponde a este $(\gamma_d)_{máx}$ se le denomina humedad óptima $(\omega_{ópt})$ y representa el contenido de agua con el cual el procedimiento de compactación que se está aplicando produce la máxima eficiencia. Pero para este tipo de prueba la $(\omega_{ópt})$ y $(\gamma_d)_{máx}$ varía de acuerdo a la energía de compactación que se use en laboratorio.

- g) **El equipo de compactación.** Es en referencia a si se utiliza un equipo de compactación convencional o un compactador con Tecnología de Compactación Inteligente.

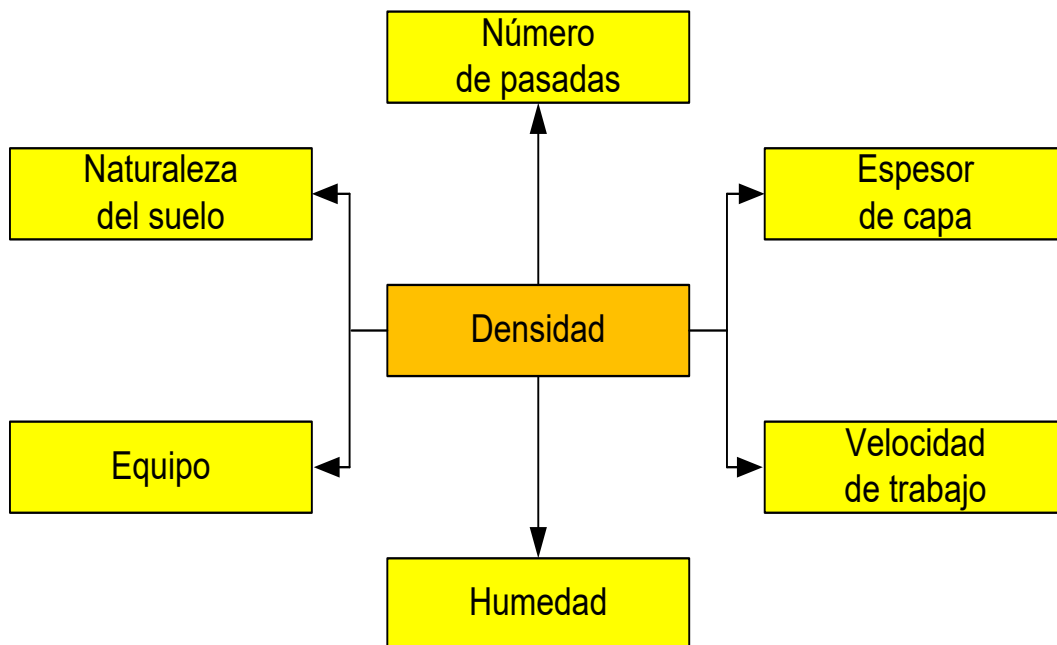


Fig. I.5.1 Principales factores que afectan la compactación.

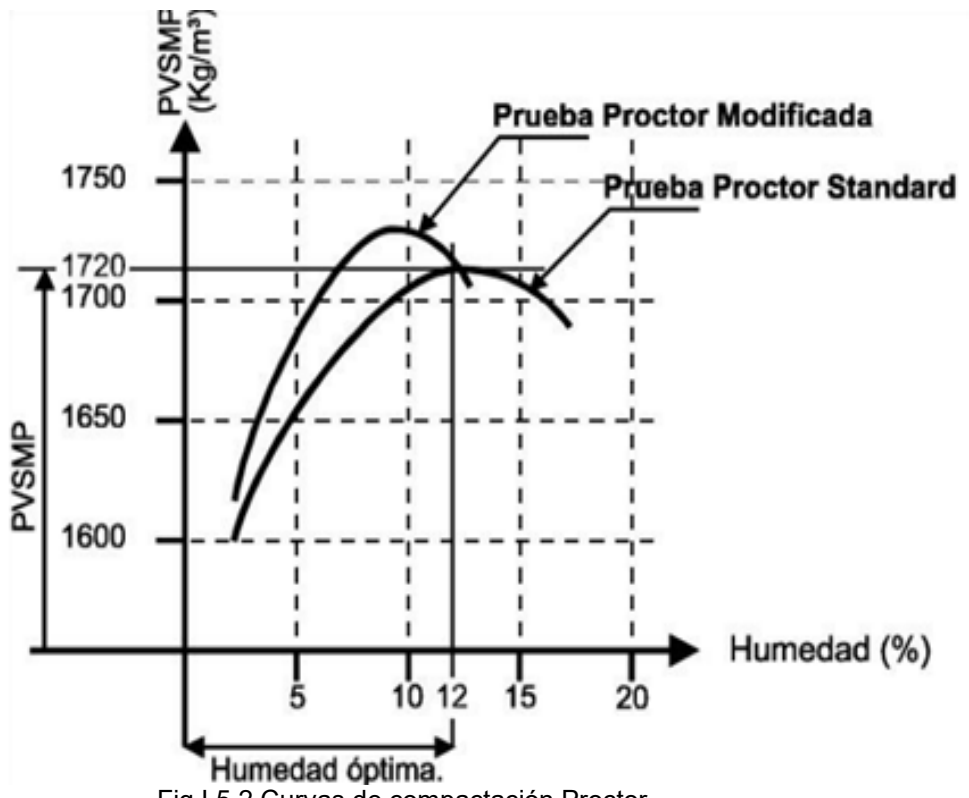


Fig.I.5.2 Curvas de compactación Proctor.

I.6 COMPACTACIÓN VIBRATORIA

Los rodillos llamados dinámicos funcionan con vibración y/o oscilación. Para el caso de compactación de suelos los compactadores de rodillo vibratorio son los más utilizados en la actualidad, prácticamente han invadido todos los materiales por compactar.

Este tipo de compactadores opera a través de la aplicación de una carga vertical de corta duración, alta frecuencia y baja amplitud. Es decir, esta máquina opera mediante una sucesión de impactos sobre la superficie del suelo en que se trabaja, origina ondas de presión que penetran en el suelo y propician el reacomodo de las partículas, lo que da como resultado la reducción de vacíos y mayor densidad del suelo. Los compactadores de vibración tienen una rueda vibradora en el tambor. Esto hace que con rápida rotación, el tambor empiece a vibrar y transmita verticalmente fuerzas de impacto al suelo. Es decir, la vibración es un proceso de compactación mediante sacudidas fuertes en el sentido vertical. La frecuencia de vibración en este tipo de máquinas tiene una gran influencia en el proceso de compactación y su intervalo de variación óptima puede comprender el rango de 0.5 y 1.5 veces la frecuencia natural del suelo, lo que lleva al aparato a frecuencias de entre 1500 a 2000 ciclos por minuto. En suelos del tipo granular son muy eficientes los compactadores vibratorios de rodillos lisos; (Fig.I.6.1) pero en el caso de materiales plásticos es recomendable el rodillo pata de cabra vibratorio. Con este tipo de compactadores la densidad del material se logra de abajo hacia arriba. Todos los equipos con sistema vibratorio deben ser operados a velocidades de 2.5 a 5 km/h. Velocidades mayores no incrementan la producción, y con frecuencia no se obtiene la compactación deseada. La compactación de suelos con rodillo vibratorio es el método con mayor eficiencia comprobada disponible en el mercado. El efecto de compactación con rodillos vibratorios es producto de la acción combinada de la frecuencia inductora de la fuerza centrífuga excéntrica, de la amplitud, la velocidad de avance, el peso propio de rodillo y el área de contacto.



Fig. I.6.1. Compactación con rodillo liso vibratorio.

En la construcción de vialidades, la elección del procedimiento y equipo necesario, será en función de la calidad y disposición de los materiales, así como de las características físicas del lugar y las especificaciones de proyecto.

La calidad de los materiales con los que se construirá un terraplén puede ser muy variada; sin embargo, la clasificación general para poder elegir el procedimiento y equipo más adecuados, depende de si el material es compactable, es decir, que se puede compactar a cierto grado de humedad, o no compactable como son los materiales granulares, con partículas relativamente grandes que no tienden a adherirse. Pero para este tipo de estructuras, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (**SCT**), define a los terraplenes en la Norma **N-CTR-CAR-1-01.009/11** como:

“Los terraplenes son estructuras que se construyen con materiales producto de cortes o procedentes de bancos, con el fin de obtener el nivel de subrasante que indique el proyecto o la Secretaría, ampliar la corona, cimentar estructuras, formar bermas y bordos, y tender taludes”.

En cuanto al equipo de compactación, el apartado **E.5.COMPACTADORES** dice: “Los compactadores serán autopropulsados y reversibles”.

“Los compactadores vibratorios estarán equipados con controles para modificar la amplitud y frecuencia de vibración”.

Ventajas de la compactación por vibración.

- a) Es posible compactar a más altas densidades.
- b) Facilita la obtención del grado de compactación especificado de proyecto.
- c) Permite el uso de compactadores más pequeños.
- d) Se pueden compactar capas de material de mayor espesor.
- e) Permite obtener la compactación deseada en menor número de pasadas
- f) El costo de compactación resulta más económico.

I.7 COMPACTACIÓN OSCILATORIA

La compactación oscilatoria tiene su origen en la rotación de masas excéntricas donde la rotación se da sobre dos ejes internos al tambor, generando movimientos oscilantes en su interior, y como consecuencia transmite ese efecto a la compactación. Este proceso provoca que el tambor oscile, la acción de la fuerza primero opera en una dirección y posteriormente en la otra. Transmitiendo fuerzas de empuje tangenciales en el suelo. La oscilación actúa con una fuerza menor, pero utiliza energía vertical y horizontal.

Los compactadores oscilatorios pueden ser utilizados en las más diversas aplicaciones en compactación de tierra, en la compactación de suelos arenosos y, en la compactación de pavimentos de todo tipo de asfalto. (Fig.1.7.1).

La compactación por oscilación es altamente recomendada sobre puentes y zonas habitacionales, porque proporciona un alto poder de compactación sin generar ondas de impacto perjudiciales a la estructura. Una de las características más importantes de la oscilación es la calidad de terminación en la compactación de distintos tipos de pavimentos, convirtiéndose en la máquina ideal para compactar asfaltos a temperaturas más bajas y proporcionando una calidad de terminación superficial similar a la que entrega un rodillo neumático.

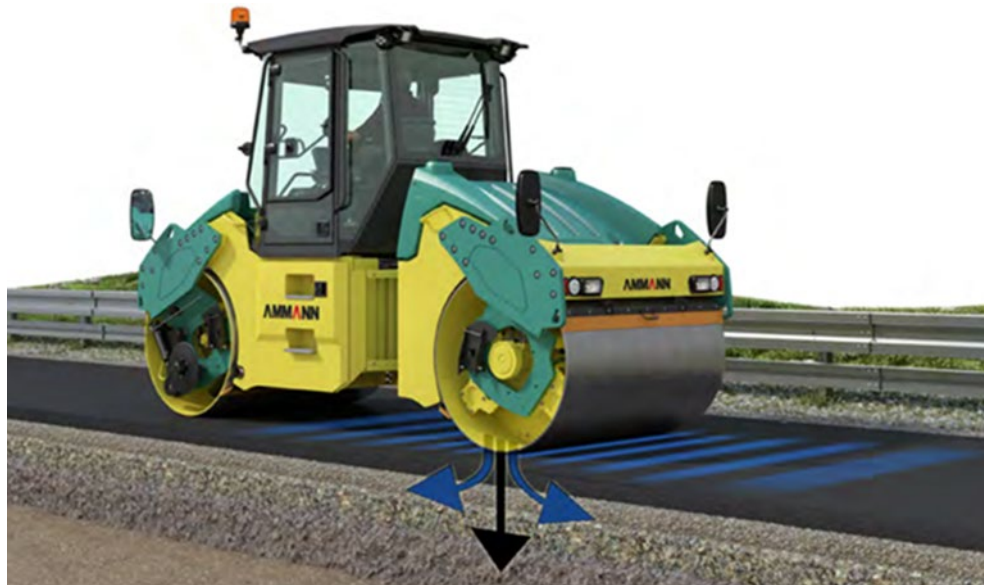


Fig. I.7.1. Compactador oscilatorio, rodillo en tándem.

En la construcción de pavimentos con asfalto, los rodillos de oscilación permiten compactar de forma fiable desde la capa base hasta la de rodadura. El fabricante de rodillos **HAMM** fue la primera empresa que a partir de 1980, presentó un compactador de oscilación con rodillos en tándem. La gama de **HAMM** abarca rodillos en tándem para la compactación de asfalto, equipos que van desde 2.5 a 15 toneladas de peso. Los tambores de oscilación son fabricados con acero de grano fino altamente resistente al desgaste, dando una garantía mínima de 4000 horas de funcionamiento. En la actualidad la oscilación ha acreditado su eficacia y se ha impuesto en el mercado, hasta el punto de que la mayoría de fabricantes de compactadores ya ofrecen rodillos de este tipo. Los rodillos oscilatorios aportan toda una serie de diversas ventajas, que se traducen en eficiencia, calidad y rentabilidad.

- a) Capacidad de adaptarse automáticamente a la superficie a compactar.
- b) La oscilación es transmitida con precisión hacia el material.

- c) Asegura un resultado óptimo de alta calidad con la máxima eficiencia reflejada en el menor número de pasadas.
- d) Ahorro de combustible.
- e) Mejor acabado de la carpeta asfáltica.
- f) Las vibraciones sobre sitios históricos y zonas residenciales dentro de una ciudad, son considerablemente reducidas.
- g) No daña las juntas frías, asegurando una buena compactación.
- h) Mayor productividad especialmente en aéreas muy amplias como las autopistas y pistas de aterrizaje.
- i) Adecuado para casi todos los tipos de materiales y espesor de capa.
- j) Evita la destrucción de partículas y la fragmentación de la capa.
- k) Puede compactar mezclas asfálticas hasta una temperatura mínima de 75°C.
- l) Un elevado rendimiento de compactación.
- m) Se producen menos cargas que con la vibración.
- n) La amplitud se reduce continuamente según la ascendente rigidez del suelo.
- o) Especialmente requeridos para trabajos en puentes.

II. COMPACTACIÓN INTELIGENTE

II.1 DEFINICIÓN

La Compactación Inteligente (Intelligent Compaction, **IC**) ha surgido como uno de los temas más debatidos en las obras de movimiento de tierras y la construcción de vialidades, ha sido definida por la Federal Highway Administration (**FHWA**), Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos, como: “La Compactación de Suelos o mezclas asfálticas, lograda a través de un rodillo vibratorio de tambor liso equipado con un Sistema Integrado de Medición del Acelerómetro instalado en el tambor del rodillo, Evaluación y Documentación, Sistema de Posicionamiento Global (**GPS**), Control Automático de Retroalimentación (**AFC**) para la amplitud, y la frecuencia de la vibración del rodillo”. A todos estos dispositivos instalados en el rodillo se le conoce como Tecnología de Compactación Inteligente.

Una alternativa a las mediciones de vibración 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. Actualmente son varias las empresas fabricantes de compactadores que aplican la tecnología de compactación inteligente al proceso de compactación de suelos o materiales de pavimento asfáltico, con rodillos vibratorios equipados con un Sistema de Medición Integrado, un Sistema de Reportes Informáticos con pantalla a bordo, un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y un sistema de Retroalimentación.

Esta tecnología permite un monitoreo del proceso de compactación en tiempo real, incluyendo sensores que reciben información y adaptan el desempeño del compactador de manera continua, optimizando así todo el proceso de compactación para alcanzar las condiciones de proyecto. Con la Tecnología de Compactación Inteligente se controlan diferentes parámetros del rodillo como vibración del tambor, amplitud, frecuencia y velocidad de desplazamiento. (Fig.II.1.1).

Un sistema de compactación inteligente ofrece cuatro funciones básicas:

- a) Mide la rigidez del suelo o del asfalto (la capacidad de un material de resistir la deformación bajo una carga) en lugar de la densidad (la cantidad de peso por volumen).
- b) Controla o dirige el esfuerzo de compactación en respuesta a la rigidez medida.
- c) Muestra en una pantalla la medida de rigidez al operador.
- d) Planifica y registra los resultados de compactación.

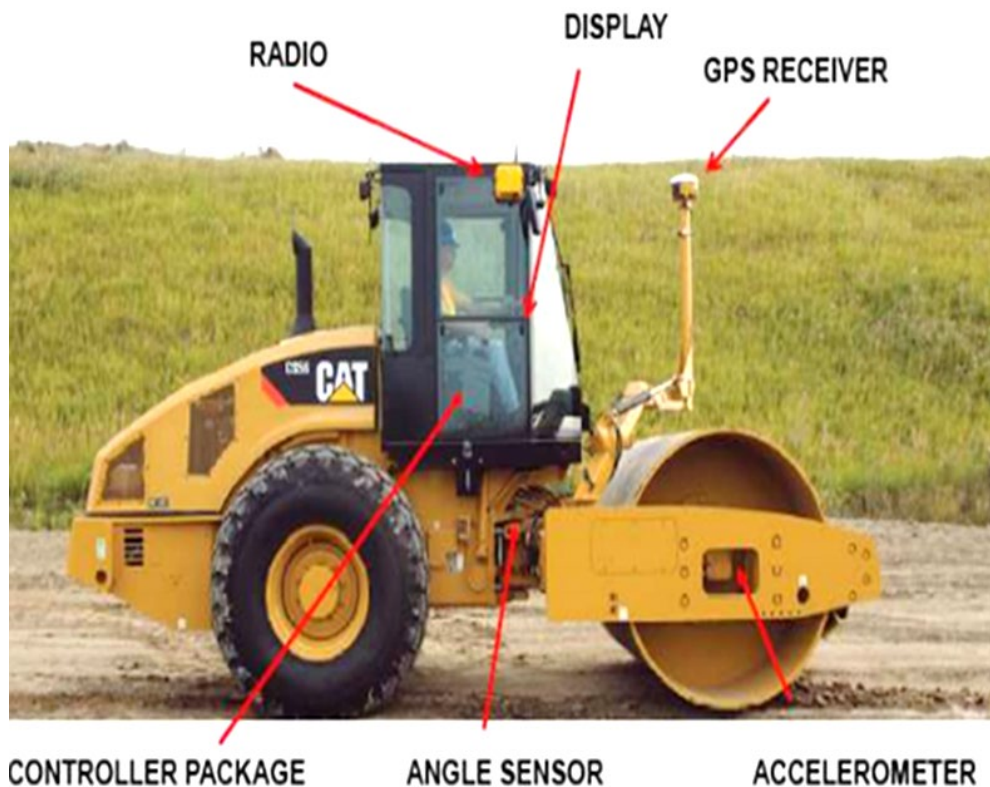


Fig. II.1.1.1. Rodillo vibratorio con tecnología de compactación Inteligente.

II.2 CONTEXTO HISTÓRICO

La compactación inteligente es una tecnología que ha estado en desarrollo desde 1980. El desarrollo y evaluación de tecnologías de medición de Control de Compactación Continua (**CCC**), se inició en Europa para su uso en rodillos vibratorios para compactación de suelos. Para la configuración en un rodillo vibratorio, **CCC** implica la medición, análisis, y registro de la calidad de compactación que proporciona un acelerómetro instalado en el tambor del rodillo. Durante décadas varios fabricantes realizaron importantes esfuerzos de desarrollo haciéndose acreedores de numerosas patentes al mismo tiempo que la compactación inteligente de suelos con compactadores de un solo tambor liso. Ofrecieron sistemas de capacitación y asistencia al operador, aunque esos sistemas eran bastante distintos de los sistemas disponibles en ese momento.

Pero la primera vez que se habló de Compactación Inteligente se hizo a través del concepto de Intelligent Compaction Measurement Values, (**ICMV**) Valores de Medición de Compactación Inteligente, investigado en 1974 por el Dr. Heinz Thurner de la Administración Sueca de Vías, quien realizó pruebas de campo sobre suelos granulares instrumentado rodillos vibratorios de tambor liso de **DYNAPAC** con acelerómetros, obteniendo datos de la rigidez o modulo del suelo. En 1975, el Dr. Thurner fundó Geodinámica en compañía de su amigo Ake Sandstrom, con el objeto de continuar investigando y desarrollando el concepto **ICMV**. En 1976, Geodynamic desarrollo el Compactómetro (Compaction Meter Value, **CMV**) Valor de Medición de Compactación. A partir de 1980, se han ido desarrollando investigaciones y aplicaciones especialmente en Suecia, Suiza y Alemania y recientemente en Japón y los Estados Unidos. A principios de los años 80, la empresa alemana **BOMAG** desarrollo un sistema de medida del Valor Omega-Terrameter, el cual provee una medida de la energía de compactación transmitida al suelo utilizando los datos del acelerómetro.

En esta década de los 80, se realizó en París la Primera Conferencia Internacional sobre Compactación de Suelos donde se presentaron artículos técnicos sobre la Medida de los Valores de Compactación Inteligente (**ICMV**) y sus aplicaciones.

Los medidores de compactación integrados en compactadores fueron objeto de las primeras discusiones internacionales, este instrumento fue conocido como **Compactómetro**. (Figs.II.2.1, II.2.2, II.2.3, II.2.4, II.2.5 y II.2.6).



Fig. II.2.1 Compactador rodillo liso AMMANN.



Fig. II.2.2 Rodillo liso CATERPILLAR.



Fig. II.2.3 Compactador rodillo liso DYNAPAC.



Fig. II.2.4 Compactador BOMAG.



Fig. II.2.5 Compactador rodillo liso SAKAI.



Fig. II.2.6 Compactador HAMM.

Fue en 1983 que Geodynamic introdujo el Oscillometer Value (**OMV**) Valor del Oscilómetro para rodillos oscilatorios, el cual es obtenido de la amplitud de la aceleración horizontal del tambor, luego **HAMM** adoptó dicha tecnología para sus rodillos de tambor oscilante.

A finales de los años 90, la empresa Suiza **AMMANN** introdujo el valor de medida Rodillo-Rigidez. Dicho valor proporciona una medida de rigidez casi estática a través de la medida del desplazamiento del tambor, la fuerza aplicada estimada y un modelo Resorte-Amortiguador que representa la interacción Rodillo – Suelo. Luego en el año 2000, **BOMAG** introdujo el Módulo Vibrador (**E_{VIB}**), que reemplazó al valor Omega, al emplear los datos del acelerómetro para determinar el desplazamiento del tambor, de manera que se puede estimar la fuerza aplicada y un modelo dinámico del Rodillo-Suelo.

En 2004, la empresa **SAKAI** en el Japón introdujo el Compaction Control Value (**CCV**), Valor de Control de Compactación, un parámetro adimensional similar a **CMV** (Valor de Medición de la Compactación).

Actualmente los fabricantes de compactadores de suelos y pavimentos asfálticos como: **BOMAG**, **AMMANN**, **DYNAPAC**, **SAKAI**, **HAMM** y **CATERPILLAR** (Fig.II.2.7, II.2.8, II.2.9, II.2.10 y II.2.11 y II.2.12)), entre otras empresas ofrecen en sus equipos la tecnología de Compactación Inteligente (**IC**), en la cual la amplitud de vibración o la frecuencia son ajustadas automáticamente. La tecnología de Compactación Inteligente equipa a los compactadores de rodillos vibratorios con instrumentación que alimentan un sistema de documentación y control de retroalimentación. Este sistema procesa la información en tiempo real y permiten estimar el modulo dinámico del suelo, mejorando la uniformidad del material y reduciendo el esfuerzo efectivo de compactación. El tambor del rodillo está equipado con un sensor, que puede ser un compactómetro o acelerómetro el cual monitorea el movimiento del tambor, el esfuerzo de compactación aplicado, la frecuencia y la respuesta del material que se está compactando.



Fig. II.2.7 Compactador tándem AMMANN.



Fig. II.2.8 Compactador CATERPILLAR doble rodillo.



Fig.II.2.9 Compactador en tándem DYNAPAC.



Fig. II.2.10 Compactador doble rodillo BOMAG.



Fig. II.2.11 Compactador doble tambor SAKAI.



Fig. II.2.12. Compactador en tándem HAMM.

II.3 FUNCIONAMIENTO

La tecnología de compactación inteligente, 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 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. El sistema facilita información del 100% del área compactada, identificando áreas de pobre compactación; además evita hacer conjeturas con base en pruebas individuales y reduce el riesgo de subcompactar o sobrecompactar y triturar el material. 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. También mantienen un registro continuo de graficas codificadas por colores lo que permite al operador ver la ubicación precisa del rodillo, el número de pasadas del rodillo y las mediciones de rigidez del material. De igual manera, usando el Sistema de Posicionamiento Global (**GPS**), se puede obtener la ubicación exacta del rodillo, velocidad y número de pasadas que han sido necesarias para completar el trabajo de compactación. El control de retroalimentación ajusta continuamente la fuerza y la frecuencia del tambor requerida para efectuar la compactación, maximizando la eficiencia y efectividad del trabajo. El dispositivo electrónico ubicado en el panel de control, dentro de la cabina de operación alerta al operador cuando se ha alcanzado el grado de compactación de proyecto, puesto que el sistema recopila, procesa y analiza las mediciones en tiempo real, el operador de la máquina tiene la oportunidad de conocer no sólo la ubicación del rodillo, sino también el número de pasadas, el esfuerzo de compactación acumulado y la respuesta del material. Además, visualizar toda esta información a través de códigos de colores o mapas colorimétricos, disponibles en una pantalla ubicada dentro de la cabina del compactador.

La tecnología de compactación inteligente en campo, tiene las diferentes etapas que se desarrollan en el proceso de Compactación Inteligente:

- a) El sistema del compactador de rodillo vibratorio detecta e identifica las áreas no compactables, que requieren algún otro tipo de estabilización.
- b) El sistema de documentación, registra e imprime las lecturas del proceso de compactación.
- c) Las lecturas registradas por los sensores, sea acelerómetro o compactómetro, determinan la efectividad del proceso de compactación. La única diferencia es la metodología empleada para el cálculo de la respuesta del material, esta varía de acuerdo a cada fabricante y la tecnología empleada para los equipos. (Fig. II.3.1).

Componentes	Función
Acelerómetro	Mide la aceleración del tambor y la transforma en rigidez del suelo
Unidad de procesamiento	Permite ver el proceso en tiempo real: Panel de control- Pantalla
Unidad de documentación	Almacenamiento de datos medidos para ser evaluados
GPS	Sistema Global de Navegación por satélite

Fig. II.3.1. Sistema de instrumentación.

II.4 BENEFICIOS

La Compactación Inteligente proporciona beneficios inmediatos en la compactación de suelos y pavimentos asfálticos. Los principales beneficios de la Compactación Inteligente, entre los cuales se pueden mencionar los siguientes:

- a) **Incremento de la productividad:** la optimización de la productividad es uno de los principales logros en la aplicación de esta tecnología, ya que alcanza la densidad óptima o deseada del material en un mínimo número de pasadas, haciendo de la compactación un proceso más eficiente.
- b) **Mejoramiento de la densidad de gran variedad de suelos y mezclas asfálticas:** en varios países de Europa, Asia y en los Estados Unidos se han documentado exitosamente el potencial de la tecnología de Compactación Inteligente en el mejoramiento de las densidades in situ.
- c) **Reducción de los costos de reparación y mantenimiento:** el incremento de las densidades en pavimentos con vidas de servicios más prolongadas y en la reducción en costos de mantenimiento de los mismos, puesto que se ha demostrado que densidades de campo pobres influyen notablemente en la falla prematura de los pavimentos, y por consiguiente en cortas vidas de servicio. El mejoramiento en términos de eficacia en las operaciones de compactación se traducen en bajos costos para los Ingenieros o contratistas y por consiguiente para las entidades gubernamentales o privadas.
- d) **Registro continuo de valores de rigidez del material:** la posibilidad de obtener los valores de rigidez del suelo en tiempo real proporcionado por esta tecnología, propicia un proceso de compactación con resultados óptimos y de mayor eficacia, pues permite identificar las áreas sobre las que aún se debe trabajar o compactar nuevamente y evita sobre compactar aquellas zonas que ya han alcanzado el valor de densidad requerido.
- e) **Mejora de la profundidad de compactación:** la magnitud de amplitud máxima de los compactadores con Compactación Inteligente es significativamente mayor a la de los compactadores convencionales.

Esto hace posible optimizar el esfuerzo de compactación basado en la rigidez medida del suelo, e incrementar la eficacia al compactar capas más profundas de todo tipo de materiales.

- f) **Mejora de la calidad para los contratistas:** los ingenieros y contratistas tienen acceso a los registros y visualización de toda la operación de compactación en la obra: número de pasadas, características de la operación de compactación y registros en tiempo real. La identificación de puntos débiles proporcionan al contratista la oportunidad de tomar las medidas correctivas apropiadas, ya sea removiendo dicho material, empleando alguna técnica de estabilización o modificando los requisitos de compactación para dicho material. Se obtiene un mejor trabajo y una obra de excelente calidad ahorrando recursos, lo que conduce a un impacto menos nocivo para el medio ambiente. (Fig.II.4.1).

MARCA	MODELO	SISTEMA DE MEDICIÓN	VALOR DE MEDIDA	SISTEMA OPERATIVO	SISTEMA DE DOCUMENTACIÓN Y EVALUACIÓN	SISTEMA DE COMPACTACIÓN	GPS
HAMM AG	SERIE 3000	HCQ (Hamm Compaction Quality)	HMV (Adimensional)	Hammtronic	HCQ (Hamm Compaction Quality)	Vibración / Oscilación (según el modelo)	HCQ-GPS Navigator
BOMAG	BW 177 DH-4 BVC BW 213 DH-4 BVC BW 226 DH-4 BVC	VARIOCONTROL	E_{vib} (NM/m ²)	Terrameter	Sistema de Gestión de Compactación BCM 05	Vibración	Requiere previa instalación Sistema BCM 05
SAKAI	Serie SV610 Serie SV510 Serie SV505	CIS (Compaction Intelligent System)	CCV (Adimensional)	N/A	AithonMT-S / AithonPD	Vibración	Compatible con la mayoría de GPS en el mercado
DYNAPAC	CA 150/250/260/280 (solo compaction meter) CA 152-702	DCA (Dynapac Compaction Analyzer)	CMV (Adimensional)	Compaction Meter	DCA (Dynapac Compaction Analyzer)	Vibración	DCA-GPS
AMMANN / CASE	SERIE SV	ACE (Ammann Compaction Expert)	Kb (NM/m)	N/A	ADS (Ammann Documentation System)	Vibración	ACE Plus
CATERPILLAR	CS563E CS573E CS583E CS663E CS683E	Sistema AccuGrade	CCV (Adimensional)	N/A	AccureGrade Office	Vibración	AccuGrade GPS

Fig. II.4.1 Aplicación de la tecnología de IC para obtener los beneficios.

III. EQUIPOS DE COMPACTACIÓN INTELIGENTE

III.1 COMPACTADORES HAMM

El mercado actual brinda una gran variedad de equipos de compactación, estos incluyen compactadores de ruedas (neumáticos), rodillo metálico liso, rodillo pata de cabra vibratorio, rodillos vibratorios y oscilatorios. Cada uno de ellos ofrece mejor desempeño y mejores resultados de acuerdo con las características o especificaciones propias de cada obra y de cada proyecto. Lo último en tecnología de compactación está a cargo de las empresas **HAMM**, **BOMAG**, **SAKAI**, **DYNAPAC**, **AMMANN**, y **CATERPILLAR (CAT)**. En 1911, la empresa Alemana Hans **HAMM** quedó registrada en la historia cuando diseñó y construyó el primer rodillo para compactación de suelos autopropulsado (apisonadora de combustión a diesel). En 1980, la empresa **HAMM** fue la primera en presentar un tambor de **OSCILACIÓN** para rodillos en tándem. Además, **HAMM** es el único fabricante que ofrece rodillos en tándem de oscilación de la clase compacta, de 2.5 a 4.5 toneladas, así como compactadores para todo tipo de suelos, capaces de compactar con oscilación. La gama de **HAMM** abarca rodillos en tándem para la compactación de asfalto de entre 2.5 a 15 toneladas; los compactadores para suelos de esta marca son conocidos en el mercado como la serie 3000. Esta serie consta de compactadores de rodillo sencillo con las características para la Compactación Inteligente (**IC**), con alto rendimiento, gran maniobrabilidad y un mínimo nivel de ruido. Esta categoría incluye **HAMMTRONIC**, **HAMM COMPACTION QUALITY (HCQ)** y **OSCILACIÓN**. (Fig.III.1.1, III.1.2 y III.1.3).



Fig. III.1.1 Interior de la cabina del compactador HAMM.



Fig.III.1.2 Compactadores rodillo liso de HAMM.



Fig.III.1.3 Línea de compactadores HAMM.

HAMMTRONIC: está controlado por un microprocesador que monitorea y controla todas las funciones del equipo. Evita posibles errores del operador, así como reducir el consumo de combustible, confort del operador, y mejores niveles de compactación. En especial los componentes de **Hammtronic** son:

- a) Gestión del motor, que ajusta automáticamente la velocidad del motor.
- b) Control de la tracción, controla el arranque y parada del cilindro.
- c) Control de vibración, compactando siempre a una frecuencia igual y predefinida.
- d) Visualización de la información, al operador se le informa en tiempo real sobre todas las funciones del equipo a través del panel de operación.

HCQ-(Calidad de Compactación Hamm): **HAMM** ofrece sistemas de compactación inteligente entre los que destaca la Tecnología de **OSCILACIÓN** y Hamm Compaction Quality (**HCQ**). La tecnología del compactómetro, para compactadores de suelos de cilindros lisos, que detecta el llenado de los vacíos del suelo; es un sistema modular de medición, evaluación y documentación de los resultados de compactación en tiempo real.

Este sistema está conformado por:

- a) **HCQ-Indicator** (indicador): que consta de un compactómetro que mide y visualiza la capacidad de carga del suelo, una computadora, un sensor y una unidad indicadora de la cual se obtiene el valor de medición **HAMM**-(HMV, Hamm Measurement Value), Valor de medición de Hamm.

- b) **HCQ-Printer** (impresora): es un sistema de visualización y almacenamiento que ilustra gráficamente la medida de compactación sobre un área definida y proporciona la opción de imprimir el reporte correspondiente a esa área (Valores de medición Hamm).

c) **HCQ-GPS-Navigator** (navegador): este módulo determina la posición exacta del compactador a través de un **GPS**. Este módulo es adaptable a cualquier equipo de compactación **HAMM** ya en uso.

d) **OSCILACIÓN**: los compactadores **HAMM** tienen rodillos oscilatorios, a través de la oscilación de la masa del tambor se introduce al tambor una fuerza tangencial que permite el contacto constante rodillo – suelo, lo cual logra una mejor y más rápida compactación.

Combinando el cilindro delantero vibratorio con el cilindro trasero oscilatorio, se obtiene un mayor grado de compactación con menor número de pasadas. En lugares donde no se puede utilizar la vibración, como puentes y zonas residenciales el compactador opera con el cilindro delantero estático y el trasero oscilando. (Fig.III.1.4)



Fig.III.1.4 Esquema del compactador HAMM vibratorio / oscilatorio.

III.2 BOMAG

Empresa fundada en 1957 en Alemania, cuenta con cinco centros de producción, Boppard, Alemania; Alfonsine, Italia; Fengxian, China; Ridgeway, EE.UU y Cachoeirinha, Brasil.

Este fabricante de compactadores con sistemas electrónicos, ha creado un sistema denominado **VARIO CONTROL** el cual integra a sus compactadores con la tecnología de Compactación Inteligente al permitir la adaptación automática de la amplitud durante el proceso de compactación.

Este procedimiento permite que la máxima energía de compactación posible sea transferida sin que el tambor rebote evitando la sobrecompactación. (Fig.III.2.1).El sistema **BOMAG** adapta de manera automática la energía de compactación del rodillo al estado y a la necesidad del terreno, mide la capacidad portante del terreno, y se calcula la energía que debe descargarse en el suelo para conseguir una compactación óptima.

El sistema se maneja desde una pantalla en cabina, en donde el operador ajusta un valor objetivo de la compactación deseada, y el sistema lo regula de manera automática. Se muestra en pantalla cuando no es necesario dar más pasadas porque el valor objetivo se ha alcanzado, y se evita la sobrecompactación del suelo, o que el rodillo “salte” por haber alcanzado la máxima compactación.



Fig.III.2.1 BOMAG. Control de la compactacion con el sistema ASPHALT MANAGER.

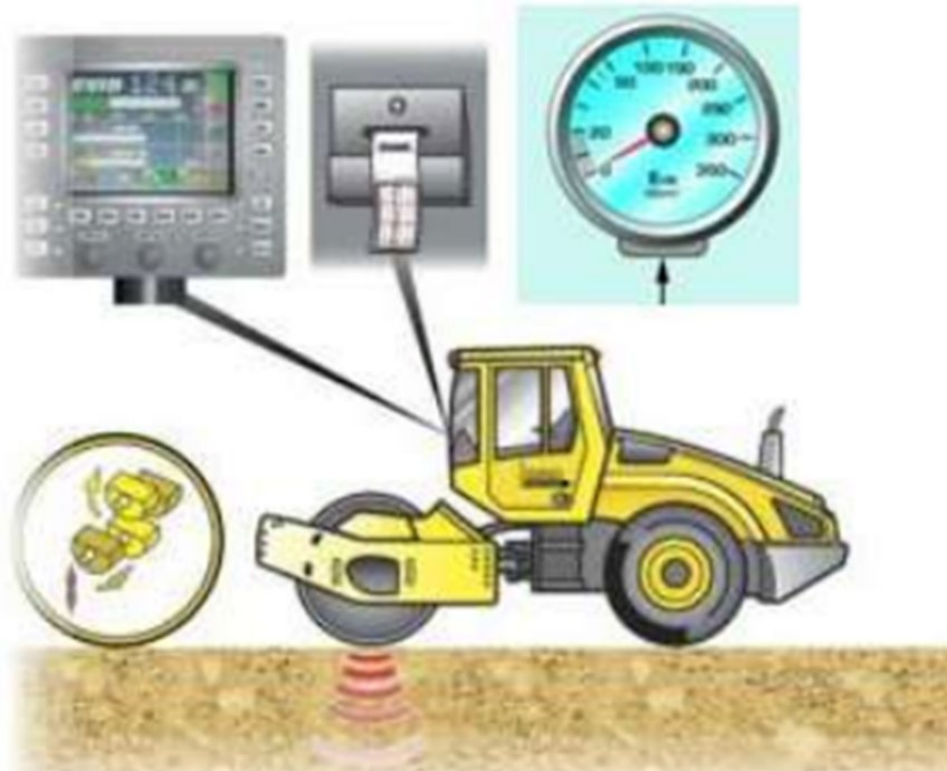
Los equipos que ofrece **BOMAG** constan de los siguientes componentes:

- a) **Terrameter BTM**: es una herramienta estándar de los rodillos con **VARIOCONTROL**; este sistema proporciona una medida directa de la rigidez de suelo en NM/m^2 durante todo el proceso de compactación, la cual se estima con base en la relación de la fuerza de contacto con el suelo y la deflexión del rodillo. También permitiendo la impresión de resultados en tiempo real.

- b) **E_{VIB}**: es el valor de medida llamado Módulo de Vibración, que relaciona el módulo de deformación. Este parámetro es medido en NM/m^2 .

- c) **ECONOMIZER**: es un sistema de medición y visualización para el control de la compactación continua durante el proceso, que permite ubicar las áreas que aún requieren compactación.

- d) **Gestión de Compactación BCM 05**, es un sistema de gestión de compactación empleado como una aplicación suplementaria en los equipos de compactación de rodillos de tambor simple. Este sistema ofrece un manejo eficiente de los datos medidos, así como la documentación y evaluación. (Fig.III.2.2.).



III.2.2 Esquema de la Tecnología de Compactación Inteligente de BOMAG.

e) **Posicionamiento Global:** es un software desarrollado por **BOMAG** para establecer conectividad **GPS** local o sistemas ATS (Advanced Tracking Sensor), (Fig.III.2.3) Sensor de Seguimiento Avanzado, en los sistemas de medición **BOMAG**.



Fig. III.2.3 Esquema de compactacion inteligente en un rodillo BOMAG.

III.3 SAKAI

La compañía fue fundada en 1918 en Japón, esta empresa fabricaba y reparaba automóviles y locomotoras, pero en 1929 comenzó a fabricar rodillos para la compactación de suelos respondiendo a la demanda interna, y exportando en 1935 a Tailandia. En 1945 debido a la segunda guerra mundial la empresa es reducida casi a escombros, pero en 1949 renace como **SAKAI** Works Ltd. En 1950 comienza a exportar compactadores a Filipinas, Tailandia y Pakistán. Actualmente **SAKAI** ofrece una amplia gama de compactadores de suelos y asfalto, así como máquinas pavimentadoras de asfalto.

La tecnología de Compactación Inteligente (**IC**) **SAKAI** ofrece:

- a) **CIS** (Compaction Information System): Sistema de Información de Compactación, el cual consta de un sistema digital de medición y Posicionamiento Global (**GPS**) en los equipos.
- b) Una pantalla: **CIS** también incluye una pantalla de visualización táctil.
- c) Un software de gestión de documentación y de evaluación que permite documentar el proceso de compactación para realizar el análisis y reportes con los resultados finales.

El **CIS** indica el grado de compactación a través del **CCV** (Compaction Control Value), Valor de Control de Compactación ya que se mide la aceleración del tambor de acuerdo a la interacción suelo-tambor, calculando el **CCV**. (Figs.III.3.1 III.3.2 y III.3.3).



Fig.III.3.1 Esquema de Compactacion Inteligente de SAKAI.



Fig.III.3.2 Receptor y antena GPS en un compactador SAKAI.



Fig. III.3.3 Compactador SAKAI con sistema GPS.

III.4 DYNAPAC

El rodillo para compactación de suelos fue inventado por los hermanos Hamm en Alemania a comienzos del siglo XX. Pero fue la empresa Dynapac en Suecia quien lanzó el primer rodillo vibratorio en 1947. Posteriormente en 1975, en estos rodillos son instalados los primeros **acelerómetros** para medir la **rigidez** de la capa compactada, dando origen a lo que actualmente se conoce como: sistema de Compactación Inteligente de Suelos. Los compactadores de **DYNAPAC** tienen instalado un acelerómetro, un sistema de posicionamiento global (**GPS**) y la posibilidad de contar y mapear el número de pasadas del rodillo mediante una pantalla instalada en la cabina del operador. Las innovaciones en la Compactación Inteligente de Asfalto se ofrecen en el sistema Dyn@lyzer donde los sensores de temperatura hacen que el sistema se pueda usar en mezclas de asfalto calientes, además de que la temperatura de cada pasada se puede registrar y cartografiar. (Fig.III.4.1, III.4.2, III.4.3, III.4.4 y III.4.5).



Fig.III.4.1 Interior de la cabina del compactador DYNAPAC.



Fig. III.4.2 Compactador rodillo liso DYNAPAC.



Fig. III.4.3 Rodillo pata de cabra DYNAPAC



Fig. III.4.4 Compactador pata de cabra IC de alta velocidad DYNAPAC.



Fig. III.4.5 Rodillo IC, DYNAPAC para compactación de mezclas asfálticas.

La tecnología de Compactación Inteligente de Suelos y Asfalto de **DYNAPAC** está desarrollada en tres niveles:

a) **Compaction meter** (Compactómetro): es un sistema que consta de un sensor de aceleración instalado en el módulo del tambor, el cual emite señales que son procesadas y visualizadas como **CMV** (Compaction Meter Value), Valor del Medidor de Compactación en el panel de control.

Adicional al acelerómetro, también se compone de una unidad de procesamiento y de visualización de datos registrados por el acelerómetro. El **CMV** muestra en el panel de control la rigidez del material compactado, indicando el máximo grado de compactación, evitando la sobrecompactación, ahorrando combustible, tiempo y desgaste de la máquina.

b) **DCA-S** (Dynamac Compaction Analyzer): Analizador de Compactación Dynapac para Suelos, es un sistema para el control de la compactación, el cual proporciona los resultados de medición y los registra, mientras el operador los visualiza en su unidad **DCA**. Básicamente este sistema, cumple las mismas funciones de Compaction Meter (Medidor de Compactación), con la ventaja que documenta los resultados para el aseguramiento de la calidad del material compactado.

c) **DCA-GPS** (Analizador de Compactación para Suelos con **GPS**): este sistema muestra la posición del compactador una vez establecido un punto o línea de referencia. El **DCA-GPS**, le presenta al operador una imagen gráfica de todo el trabajo de compactación mostrando las variaciones de **CMV** en una escala calorimétrica que le permite identificar fácilmente las áreas que requieren compactación adicional.

III.5 AMMANN

Esta empresa nace por la iniciativa de Jakob Ammann en 1869 en Madiswil, Suiza. En 1911 desarrolla un rodillo impulsado por un motor de combustión interna. En 1930 abre una planta en St-Dizier, Francia. Pero aparece la competencia, en 1931 comienza a distribuir Caterpillar en Suiza.

Ammann es un proveedor líder a nivel mundial en máquinas y servicios para la industria de la construcción con especialización central en la infraestructura de transporte y la construcción de carreteras. La empresa familiar ha tenido éxito internacional desde 1869.

La tecnología continúa evolucionando y las plantas y máquinas brindan una clase de productividad que no podía imaginarse en aquellos años. Hoy en día, la compañía Suiza tiene alcance mundial y una extensa línea de productos.

Los compactadores con Compactación Inteligente (**IC**) de **AMMANN** ofrecen en sus equipos los siguientes componentes:

ACE (Ammann Compaction Expert): Experto de Compactación Ammann, es un sistema de medición y control disponible para los compactadores de rodillo vibratorio, el cual calcula el grado de compactación del suelo y ajusta automáticamente la amplitud y la frecuencia de compactación de acuerdo a las condiciones de la capa que está compactando. El sistema calcula la velocidad ideal del tambor y la cantidad de energía que debe ser transferida a la capa. **ACE** visualiza y documenta la información de trabajo del proceso de compactación a través de su Sistema **ADS** (Ammann Documentation System), Sistema integrado de Documentación Ammann. (Fig.III.5.1).



Fig.III.5.1 Vista interior del compactador AMMANN.

- a) **ACE Plus**, es la combinación del sistema Experto de Compactación Ammann con un sistema de navegación (GPS) que provee a los compactadores de un análisis eficiente y documentación para el control de compactación continua. Este sistema de navegación satelital asigna valores de compactación medidos mediante posicionamiento de coordenadas en tiempo real.
- b) **ACE Pro**, este sistema reduce significativamente el número de pasadas, ajusta automáticamente los parámetros de vibración, aporta información completa relativa al desarrollo de compactación, valores que pueden además conseguirse con coordenadas GPS. (Figs. III.5.2, III.5.3, III.5.4 y III.5.5).



Fig. III.5.3 Rodillo AMMANN de llantas pequeñas con Tecnología IC.



Fig. III.5.4 Compactador AMMANN pata de cabra.



Fig.III.5.5 Rodillo liso AMMANN con sistema IC.

III.6 CATERPILLAR (CAT)

La historia de esta poderosa compañía fabricante de maquinaria pesada se remonta al año 1890 cuando los empresarios y rivales Daniel Best y Benjamín Holt hacían esfuerzos para mejorar la tracción de los tractores de vapor (con un peso de 18 ton) que se usaban en la agricultura que se desarrollaba en el valle central de California, en los Estados Unidos.

El problema fue resuelto por Holt en 1904, reemplazando las ruedas con cadenas, era el primer tractor de orugas o cadenas, pero no tenía nombre, el nombre de **Caterpillar** surgió cuando un espectador del público comentó que la máquina se movía como una “**oruga**”, y en 1906 el pesado motor de vapor fue transformado en un motor de gasolina.

Caterpillar Tractor Company (**CAT**) se fundó en 1925 a partir de la fusión de Holt Manufacturing Company y la Best Gas Traction Company. Estas dos compañías habían tenido su origen en 1865 en la costa oeste de los Estados Unidos, en California.

En 1929 Caterpillar cambia sus motores de gasolina a motores diesel. Pero la depresión que padeció aquel año los Estados Unidos le causó cuantiosas pérdidas, pero gracias a las compras soviéticas la compañía siguió siendo rentable. Actualmente Caterpillar es una empresa dedicada a la fabricación de maquinaria para la industria de la construcción, aplicaciones forestales, agrícolas y mineras entre otras. Igualmente los equipos de Compactación Inteligente de Caterpillar ayudan a los Ingenieros civiles y contratistas a monitorear el trabajo completo del área compactada y además ayuda a simplificar el trabajo del operador. En relación a los elementos de la compactación Inteligente de asfalto, los sensores de temperatura ayudan a los operadores a determinar si están compactando a la temperatura correcta para alcanzar el objetivo de densidad deseado; otra herramienta tecnológica de Caterpillar es la planificación del conteo de pasadas, lo que asegura que la cobertura de capas de asfalto sea completa y la compactación uniforme (Figs.III.6.1, III.6.2, III.6.3 y III.6.4).



Fig.III.6.1 Pantalla de visualización del compactador vibratorio CATERPILLAR.



Fig. III.6.2 Compactador rodillo liso con sistema de compactacion inteligente.



Fig. III.6.3 Compactador CATERPILLAR pata de cabra Con Tecnología IC.



Fig. III.6.4 Compactador en tándem para mezclas asfálticas.

La solución es desarrollada por **CAT** en tecnología de Compactación Inteligente tiene varias categorías:

AccuGrade Compaction (sistema de Grado de Compactación): con el sistema **GPS** y de medición se permite documentar el control y aseguramiento de calidad. Este sistema de Compactación Inteligente mide la rigidez del material o la habilidad de dicho material a resistir la deformación bajo una carga, en lugar de la densidad. El sistema registra la información enviada por el acelerómetro, que mide el movimiento del tambor y luego la convierte a valores de rigidez **CATERPILLAR**, llamados **CCV** (Caterpillar Compaction Values), Valores de Compactación de la Oruga.

- a) **AccuGrade ARO**: integra el sistema AccuGrade Compaction a los sistemas de la máquina y los controles para optimizar el rendimiento y la confiabilidad.
- b) **AccuGrade GPS**: emplea la tecnología del posicionamiento global con el fin de proporcionar la localización precisa del rodillo con una precisión de centímetros, la información está disponible en una pantalla de visualización. (Fig.III.6.5 y III.6.6).
- c) **AccuGrade Office**: es un software que ofrece un paquete de soluciones para que de forma inalámbrica se establezca comunicación entre varios compactadores que se encuentren en un mismo proyecto.

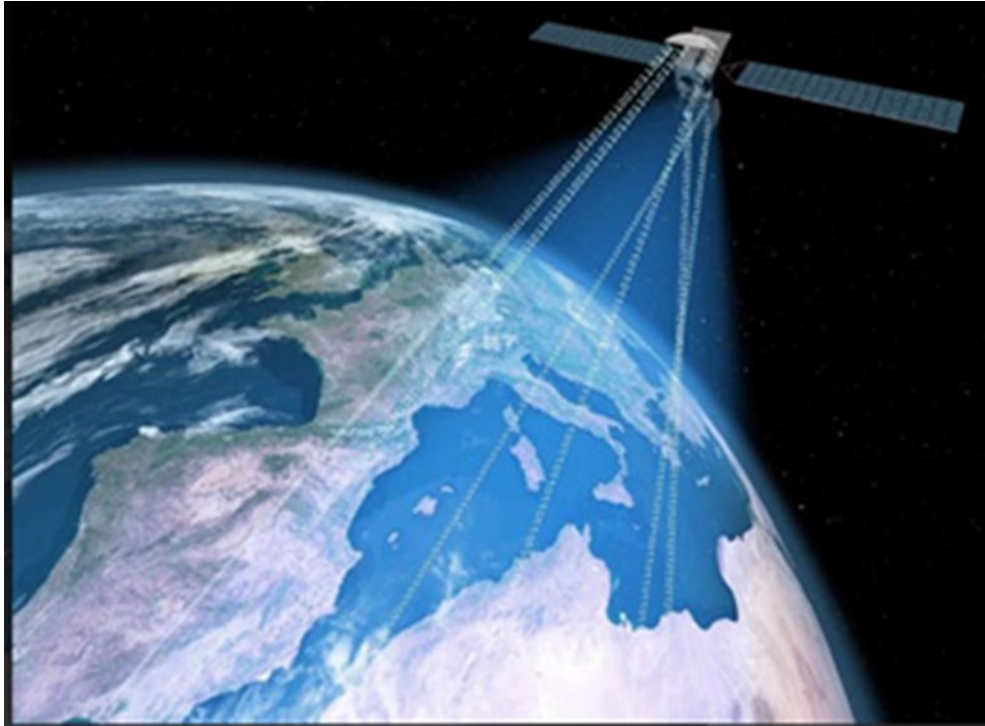


Fig.III.6.5 Satélite en orbita



Fig.III.6.6 Receptor GPS en un rodillo Caterpillar.

IV. CONTROL DE CALIDAD DE LA COMPACTACIÓN INTELIGENTE

IV.1 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

La implementación y adquisición de la Tecnología de Compactación Inteligente se encuentra disponible según el fabricante de equipos de compactación. Los diferentes sistemas están integrados por los principales componentes que lo integran como: termómetros, acelerómetros, compactómetros, **GPS** y pantallas de visualización (Fig. IV.1.1 y IV.1.2).

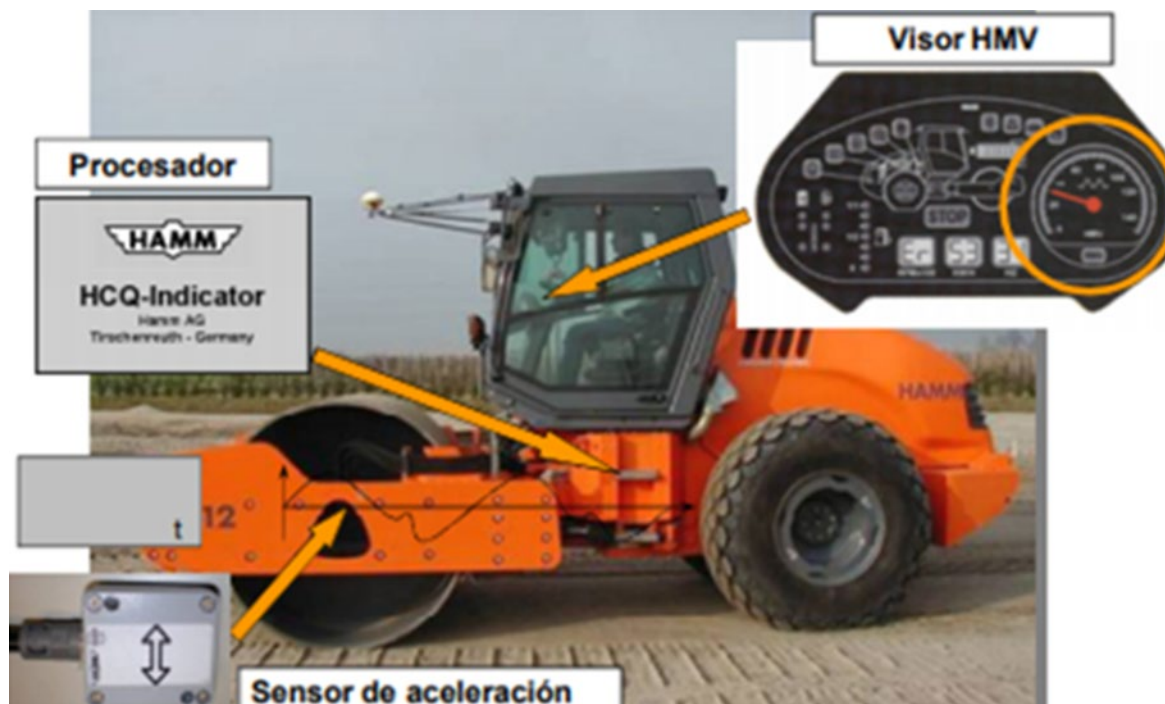


Fig. IV.1.1 Rodillo liso con compactómetro y visualización de control.

Para determinar la efectividad del proceso de compactación, los medidores de compactación o los acelerómetros se montan en el tambor 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 es propiedad exclusiva del fabricante del equipo. La respuesta del suelo se puede conocer mediante un índice de compactación o valores de rigidez / módulo.

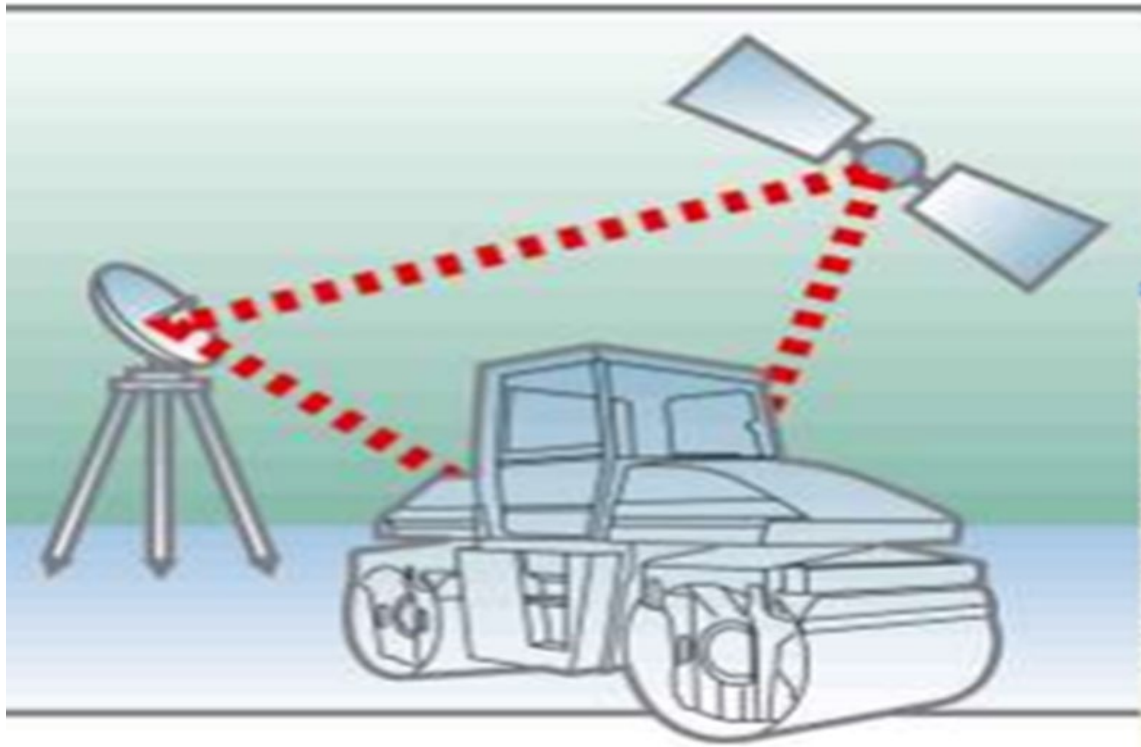


Fig. IV.1.2 Esquema de funcionamiento posicional satélite, receptor, compactador.

Para rodillos de asfalto el equipo de Compactación Inteligente cuenta con una instrumentación de temperatura adicional que permite al operador controlar la temperatura de la superficie del material asfáltico del pavimento. La Compactación Inteligente, conocida en los países europeos como Continuos Compaction Control - **CCC** – Control de Compactación Continua, ha sido aplicada exitosamente en los últimos años en muchos de los proyectos desarrollados en Austria, Alemania, Suecia y en los Estados Unidos.

Es importante mencionar que la **ISSMGE** (International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineerig), Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica adoptó las especificaciones de Austria como estándares para el uso de la Compactación Inteligente de Suelos.

La tecnología **IC**, (Intelligent Compaction) tiene varios beneficios para los diversos materiales, el **IC Road Map** (Mapa de Ruta de la Compactación Inteligente), elaborado por la Federal Highway Administration, **FHWA**, USA (Administración Federal de Carreteras de los estados Unidos), institución que desarrollo un estudio y un software para realizar el control de calidad en los proyectos que emplean la tecnología de Compactación Inteligente.

Esta herramienta es conocida como **ICMV** (Inteligente Compaction Mesurement Values), Valores Medidos de Compactación Inteligente, grafica los valores medidos de compactación, y calcula el número de pasadas óptimo para cada proyecto en específico. La **FHWA**, describe la forma más eficiente de comenzar a implementar este sistema:

1. **EQUIPOS Y TECNOLOGÍAS**
 - a) Estandarización de sistemas de medición de rodillo de **IC**.
 - b) Uso práctico del **GPS** en **IC**.
 - c) Pruebas válidas de punto in situ para correlacionar con mediciones de **IC**.
2. **GESTIÓN E INTEGRACION DE DATOS**
 - a) Base de datos **IC** nacional y directrices de recopilación de datos.
 - b) Estandarización de almacenamiento e intercambio de datos **IC**.
 - c) Implementación de software para visualización de informes y datos de **IC**.
3. **ESPECIFICACIONES**
 - a) Aplicación de Compactacion Inteligente, la inspección y análisis en procesos de Control y Aseguramiento de Calidad (**QC/QA**).

- b) Grupo de Tareas de Expertos (Expert Task Group, **ETG**) para el desarrollo de la Directrices Nacionales para las especificaciones de Compactación Inteligente, especificación de la American Association of State Highway and Transportation Officials, **AASHTO IC** (Asociación Estadounidense de Funcionarios de Autopistas Estatales y Transporte en Compactación Inteligente).
 - c) Soporte técnico para el desarrollo y personalización de especificaciones.
4. TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA Y CAPACITACIÓN
- a) Talleres de IC y certificación.
 - b) Demostración de campo de la IC.
 - c) Sitio web de IC y base de conocimiento.

Esta nueva tecnología tiene que ser estandarizada y regulada por las entidades competentes para su aplicación en proyectos municipales, estatales y a nivel nacional. Además, 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 el costo de implementación requiere una inversión mayor a la que se realiza al adquirir compactadores convencionales o tradicionales. Costos de transporte del equipo hasta México, impuestos de importación, nacionalización, y otros costos que incluyen la capacitación y entrenamiento a operarios e Ingenieros residentes y contratistas en el manejo de estos equipos.

El precio de los equipos está sujeto al mercado cambiario, el costo varía de acuerdo a la nacionalidad del fabricante, entonces las transacciones se realizan en euros o en dólares.

No obstante, vale la pena destacar que los compactadores ya existentes pueden ser adaptados con instrumentación y sistemas de documentación que les permitan a los Ingenieros y contratistas llevar a cabo los procesos de Compactación Inteligente de igual manera que los que realizan los equipos nuevos dotados con esta tecnología desde la fábrica.

De acuerdo a lo anterior, algunos fabricantes ofrecen dentro de su línea de productos un kit (equipo) básico que permite equipar a los compactadores, siempre y cuando correspondan al mismo fabricante. El kit incluye el sistema de instrumentación, de documentación y de posicionamiento global. En el sondeo comercial, el kit (termómetro, acelerómetro, compactómetro, pantalla de visualización y GPS) tiene un costo promedio de 40000 a 50000 euros, aproximadamente un millón de pesos mexicanos.

En México todo depende de los Ingenieros Civiles y contratistas quienes tienen la última palabra a la hora de decidir la implementación o no de esta tecnología, y estos a su vez dependen de las exigencias y condiciones establecidas por las entidades estatales encargadas de gestionar proyectos viales. Por esta razón, se puede decir que es en los Colegios, Asociaciones o Federaciones de Ingenieros Civiles donde se debe motivar el cambio, pues son quienes tienen poder de decisión y están involucrados en los procesos de planeación y construcción de proyectos viales municipales, estatales a nivel nacional o internacional.

Son ellos quienes deben actuar acorde a la necesidad e importancia de construir infraestructura más duradera y de calidad, ya que este no sólo es un problema económico sino también social e inclusive político.

IV.2 EQUIPOS CON POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)

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. En este caso la ubicación precisa del rodillo, su velocidad y el número de pasadas en una ubicación determinada, se asignan utilizando el Sistema **GPS** (Global Position System) Sistema de Posicionamiento Global. Aunque su nombre correcto es Sistema Global de Navegación por Satélite (**GNSS**), que permite determinar en todo el mundo la posición de un objeto, una persona, un vehículo, o una nave con una precisión hasta de centímetros. Los pioneros en su invención se atribuyen a los gobiernos de Francia y Bélgica, el sistema fue desarrollado, instalado y operado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América. El **GPS** funciona mediante una red de 27 satélites (23 en operación y 3 de respaldo) en órbita sobre el globo terrestre a 20 mil 200 km, con trayectorias sincronizadas para cubrir toda la superficie de la Tierra (Fig.IV.2.1).



Fig.IV.2.1 Satélite en órbita GPS.



Fig. IV.2.2 Maquinaria para vías terrestres con sistema GPS

Para asegurar una recopilación de datos precisa y consistente son necesarias las siguientes características:

- a). Sistema **RTK GPS** (Real Time Kinematic, Global Position System) Navegación Cinética Satelital en Tiempo Real, de un Sistema de Posicionamiento Global en el compactador.

- b). Informes del sistema y registro de valores en coordenadas **UTM** (Universal Transverse Mercator), el sistema de Coordenadas Universal Trasversal de Mercator se utiliza para referenciar cualquier punto de la superficie terrestre, utilizando para ello un tipo particular de proyección cilíndrica para representar la tierra sobre el plano. Aunque las coordenadas estatales o regionales son también por lo común utilizadas para el sitio del proyecto.

- c). La asistencia técnica del fabricante de rodillos con equipos de **GPS** en el sitio de proyecto, con suficiente conocimiento técnico para el funcionamiento y operación en campo (Fig.IV.2.2 y IV.2.3).

d). Información de contacto con técnicos del fabricante durante las pruebas de campo cuando la asistencia presencial no sea posible.

Antes de la recopilación de datos de la Compactación Inteligente durante la operación de compactación, la configuración del **GPS** debe validarse utilizando un receptor móvil **GPS** de grado topográfico.



Fig.IV.2.3 Graficas de colores para monitoreo de la rigidez del material compactado.

IV.3 ACTUALIDAD

Una característica fundamental que tienen los rodillos de Compactación Inteligente es un sistema para recolectar, procesar y analizar las mediciones en tiempo real. Esta característica permite al operador del compactador conocer en forma instantánea 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 pueden utilizar estos datos para ajustar continuamente la fuerza y la frecuencia del tambor a fin de maximizar la eficacia y la efectividad de la compactación. La pantalla instalada en el rodillo de Compactación Inteligente alerta al operador cuando se obtiene la compactación máxima, eliminando pasadas innecesarias. En el caso de detectar áreas con carencias de compactación, el sistema notifica al operador las áreas problemáticas, su análisis y el número de pasadas adicionales para lograr la compactación deseada.

Los rodillos utilizados para compactar suelos equipados con sistemas electrónicos usan un solo tambor. Los tambores pueden ser lisos poligonales y con un juego de carcassas pata de cabra intercambiables. Los rodillos utilizados para compactar materiales asfálticos para pavimentos utilizan una configuración de doble tambor liso.

Ahora bien, en cuanto al Impacto Ambiental que generan los equipos de compactación con la emisión de gases tóxicos afectando la calidad del aire, como el **CO₂** (dióxido de carbono), **NO₂** (dióxido de nitrógeno) y el **CO** (monóxido de carbono), ya se está resolviendo el problema mediante el control de emisiones. Dentro de la Unión Europea (**UE**, Alemania, Austria, Bélgica, Bulgaria, Chipre, Croacia, Dinamarca, Eslovaquia, Eslovenia, España, Estonia, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Irlanda, Italia, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Malta, Holanda, Polonia, Portugal, Reino Unido, República Checa, Rumanía y Suecia) a partir del 2019, las máquinas de construcción deben cumplir el nivel de emisiones **STAGE V** (Nivel 5).

Que establece límites a las emisiones de contaminantes atmosféricos, y límites a las emisiones de partículas. A las máquinas con motor a diesel se les instala el filtro de partículas diesel. Todo esto en beneficio de la salud, la protección laboral y el medio ambiente. Para esto la empresa **BOMAG** ha presentado el rodillo tándem con motor de gas (Fig.IV.3.1), con velocidad de desplazamiento y rendimiento de compactación equivalente a una máquina con motor a diesel.

La máquina funciona con gas licuado ecológico (llamado **GNL**, gas natural licuado o **GLP**, gas licuado de propano). Con un tanque intercambiable se puede trabajar hasta 5 horas. El motor de gas cumple el nivel **V** de emisiones de la **UE** y ofrece a las empresas constructoras una alternativa para la Compactación Inteligente de suelos y control de emisiones.



Fig. IV.3.1 Compactador en tándem con Motor de GAS

IV.4 PRUEBAS IN SITU

El proceso de compactación se puede controlar durante su ejecución llevando a cabo la verificación de resultados obtenidos midiendo las propiedades físicas y mecánicas de la capa compactada y realizando controles sobre la forma como se utiliza el material. Se determina la eficiencia del proceso basado en el Grado de Compactación (**GC**), en porcentaje, al relacionar el peso volumétrico obtenido in situ y el peso volumétrico seco obtenido en la pruebas de laboratorio. Los porcentajes preestablecidos de proyecto van de un 90%, 95% ó 100% lo cual depende del tipo de obra o importancia del proyecto.

$$GC[\%] = \frac{\text{Densidad Seca del Suelo "in situ"}}{\text{Densidad Máxima Seca de Lab.}} \times 100$$

En México, el control de la compactación de suelos se hace aún mediante la toma puntual de densidades, ya sea por el método del **Cono de Arena** o mediante el **Densímetro Nuclear**, o en su caso por rodamiento de prueba y visual. Cada método de medida tiene sus ventajas pero también desventajas que hacen que su uso resulte práctico o incómodo. Los conos de arena son costosos y demandan tiempo de transporte y almacenamiento, y la normativa federal hace que los indicadores de densidad nuclear sean de alto riesgo. Pero, a pesar de ser medidas eficientes se limitan solamente a la zona inspeccionada y como consiguiente deben aceptarse como representativas de un área mayor.

Cono de arena: se pueden realizar pruebas para determinar la densidad húmeda y la densidad seca, y a partir de éstas la Densidad Proctor con la que se determina el grado de compactación (Fig.IV.4.1). Básicamente, el procedimiento consiste en extraer material hasta unos 15 centímetros de profundidad, luego se pesa dicho material, se seca en el horno y se pesa nuevamente para obtener la humedad del suelo. El volumen del material extraído se determina llenando con arena de características conocidas, de manera que conociendo el peso del cono de arena antes y después, es posible conocer el volumen del material extraído inicialmente.



Fig. IV.4.1 Cono de arena para la prueba in situ.

Densímetro nuclear: el empleo de sondas radiométricas permite determinar la densidad de los suelos de una manera rápida y no destructiva. Este método se basa en el principio de que los suelos absorben menos radiación que aquellos que están más densos, por lo que los rayos gamma de una fuente radioactiva penetran en el suelo, pero sólo un porcentaje de ellos se refleja, según sea el porcentaje de vacíos en dicho suelo.

Los rayos reflejados son registrados y detectados en un contador y luego, convertidos a unidades de densidad húmeda. A diferencia de otros métodos que requieren mucho tiempo, con el densímetro nuclear se obtiene la medición radiométrica que proporciona resultados en pocos minutos (Fig.IV.4.2 y IV.4.3).



Fig. IV.4.2 Vista de perfil del Densímetro Nuclear



Fig. IV.4.3 Vista en planta del Densímetro Nuclear.

El **Densímetro** Nuclear es un aparato muy confiable para medir la humedad y la densidad de un suelo compactado, pero es altamente radiactivo por lo que su manipulación es muy riesgosa, es un equipo portátil que emite Radiotoxicidad muy alta debido a la fuente radioactiva Americio 241 que es utilizado para medir la humedad, además del Cesio 137 utilizado para medir la densidad con radiación ionizante alta, entonces, toda persona que trabaje con este aparato, primero tendrá que recibir capacitación en lo referente al uso, transporte almacenamiento calibración y mantenimiento del equipo, ya que el operador de un densímetro nuclear estará expuesto a radiaciones. De esta manera, las pruebas in situ con el densímetro nuclear puede presentar sitios insuficientemente densificados, y lo que es igualmente grave, si el grado de compactación está por debajo, se recomendaría sobrecompactar en toda el área ya compactada, lo que implica rotura de partículas y cambios estructurales del material, causando serios daños en la durabilidad del pavimento construido.

Pero por lo común, los materiales para pavimentos poseen densidades óptimas que aseguran un soporte, estabilidad y resistencia adecuados, lograr estas densidades de manera uniforme es la clave.

Es aquí donde aparece la Tecnología de Compactación Inteligente que ayuda en este proceso, con una amplia gama de equipos de compactación para suelos y pavimentos asfálticos. La Compactación Inteligente puede proporcionar una cobertura total de control de calidad, lo cual volvería obsoletas las pruebas manuales costosas y que llevan tiempo. Así entonces, el Ingeniero o contratista seleccionará la maquinaria, el espesor de capa de suelo o asfalto y controlar los contenidos de humedad y temperatura según sea el caso para lograr la cantidad especificada de compactación. En particular, esta tecnología reduce significativamente la variabilidad de la densidad medida. Las densidades in situ pobres o deficientes se obtienen en menor tiempo y con menores pasadas del rodillo que con el sistema tradicional. Esta nueva tecnología permite al personal de proyecto tomar decisiones inmediatas con respecto al curso de acción a seguir durante la compactación.

Existen varias opciones: eliminación y reemplazo del material débil, estabilización y recompactación o la modificación de los requisitos de compactación para el material en específico.

V. CONCLUSIONES

1. La compactación es uno de los procesos más importantes en la construcción de obras viales, ya que es el proceso responsable de lograr pavimentos de alta calidad y uniformidad asegurando un mejor desempeño de la estructura o vialidad en general a largo plazo.
2. Los procedimientos actuales que utilizan máquinas de compactación convencionales pueden dar como resultado densidades de materiales inadecuadas y/o no uniformes, que pueden ser uno de los principales factores en la falla prematura de pavimentos. La capa compactada está subcompactada o sobrecompactada.
3. Al invertir en Tecnología de Compactación Inteligente, se está invirtiendo en procesos de compactación con densidades de materiales constantemente altas y uniformes.
4. Un trabajo de compactación es más eficiente cuando la densidad óptima se obtiene rápidamente por un número mínimo de pasadas.
5. La optimización de la productividad aumenta la cantidad de material compactado en una jornada de trabajo. Debido a que los sistemas de Compactación Inteligente están diseñados para operar a un esfuerzo de compactación óptimo, la compactación es más eficiente y de alta calidad.
6. Al usar tecnología de Compactación Inteligente, los Ingenieros o contratistas pueden minimizar las reparaciones con un método de compactación optimizado destinado a mejorar el rendimiento del pavimento, la durabilidad y un menor mantenimiento.

7. La Compactacion Inteligente de Suelos tiene 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 para la aceptación o rechazo de la capa compactada in situ.
8. Con este sistema, los operadores pueden identificar puntos débiles o áreas mal compactadas y las capas ya terminadas. Y en todo caso aplicar criterios de corrección.
9. En México y en el resto del mundo, cada día aumenta la necesidad de registrar proyectos de bajo costo, ambientalmente amigables y con resultados concretos. Es aquí donde destaca la Compactación Inteligente de Suelos como una tecnología moderna y eficiente, pues no solo ayuda a prevenir el deterioro prematuro de los pavimentos debido a procesos de compactacion inadecuados, sino que también hace posible hacerlo a bajo costo, pues evita pasadas innecesarias y el ahorro de tiempo y dinero.
10. Pero no cabe duda, que la adquisición de compactadores equipados con Tecnología de Compactación Inteligente representa una inversión elevada comparada a la de un compactador convencional. El valor de compra es más elevado comparado a otros sistemas, el costo de mantenimiento también es más alto. En opinión de todas las empresas mencionadas en esta tesis, aseguran que solo entre el 10 y el 15% de los proyectos a escala donde interviene la compactación pueden permitirse la inversión en tecnología de Compactación Inteligente de Suelos. No obstante, es un costo justificable por la gran cantidad de beneficios que proporciona.

11. La tecnología de Compactación Inteligente se inició hace aproximadamente 40 años, en México, sería necesario implementar el sistema, realizar tramos de prueba que permitan comparar el desempeño de equipos y la eficiencia del proceso de compactación al utilizar compactadores convencionales y compactadores equipados con sistemas electrónicos, con el objetivo de establecer los beneficios.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) Alcaraz Lozano Federico.
Rico Rodríguez Alfonso.
“Compactación”.
- 2) Rico Rodríguez Alfonso
del Castillo Mejía Hermilo
“CONSIDERACIONES SOBRE COMPACTACIÓN DE SUELOS EN
OBRAS DE INFRAESTRUCTURA DE TRANSPORTE”.
IMT, Mex.1992.
- 3) Favela Lozoya Fernando
“Apuntes de Movimiento de Tierras” Tomo II.
UNAM.
- 4) del Castillo Hermilo.
“La Ingeniería de Suelos en las Vías terrestres” Vol. 1 y 2.
México: Limusa, 2005.
- 5) Pasquel Lujan Roberto
“Construcción de Pavimentos – Compactación”
UNAM.
- 6) Ponce Serrano Alejandro
“Trabajo del Equipo de Compactación”
Tesis.
UNAM, Facultad de Ingeniería.
México. D.F. 1981.

Páginas Web.

- a) Compactación-ptlomeo.unam.mx.
www.ptolmeo.unam

- b) Manual de prácticas de Movimiento de Tierras-DIC y G.
[Dicyg.fi-c.unam.mx>labgeotecnia](http://Dicyg.fi-c.unam.mx/labgeotecnia)

- c) Compactación de Suelos – Calameo
<https://www.calameo.com/books>

- d) Implicaciones prácticas de los sistemas de calidad de compactación
www.amaac.org.mx

- e) Calameo – Compactación de suelos.
<https://www.calameo.com/books>

- f) HAMM-Más de 30 años de oscilación: Soluciones de edificación.
<https://www.ciber.com.rb/es/noticias>

- g) La tecnología integrada de compactación de suelos Caterpillar.
<https://www.obrasurbanas.es>

- h) Parts and More Compact Parts del tambour-Wirtgen Group.
<https://media.wirtgen-grup.com>

- i) GUIA PRÁCTICA DE MAQUINARIA ADECUADA PARA LA...
<https://repository.udem.edu.com>