

**CAT® PAVING PRODUCTS**

# GUÍA PARA LA COMPACTACIÓN DE SUELOS

**CATERPILLAR**



SAFETY WARNINGS

- Warning 1: Falling object (triangle with exclamation mark)
- Warning 2: Moving parts (triangle with exclamation mark)
- Warning 3: Falling blade (triangle with exclamation mark)
- Warning 4: Trapped body parts (triangle with exclamation mark)

OPERATIONAL INSTRUCTIONS

- 1. Before starting the engine, ensure the blade is lowered.
- 2. Do not touch the blade while the engine is running.
- 3. Always use proper lifting techniques.
- 4. Keep clear of the blade's path.

STUBELERS



**CAT** CS78B



**CAT® PAVING PRODUCTS**

# GUÍA PARA LA COMPACTACIÓN DE SUELOS

GUÍA PARA LA COMPACTACIÓN DE SUELOS

**CATERPILLAR®**

La *Guía para la Compactación de Suelos* es una publicación de Caterpillar® Paving Products. No se escatimaron esfuerzos para asegurar que las especificaciones e información integrada en esta guía estén correctas. Cualquier información relacionada con algún resultado se proporciona para efectos estimativos únicamente. Debido a las diferentes variables que cada proyecto de compactación particularmente presenta (tipo y características del suelo, aditivos, contenido de humedad, especificaciones, equipo disponible, operadores capacitados, aplicaciones seleccionadas por el propietario, condiciones de la superficie, altitud, etc.) ni Caterpillar Inc. o sus distribuidores garantizan que las máquinas y metodologías aquí descritas darán los resultados que se estiman. Debido a que las especificaciones de equipos y materiales están sujetas a cambios sin previo aviso, consulte la última información sobre los productos y opciones disponibles con su distribuidor Cat. Las máquinas que se muestran en esta guía pueden incluir equipo opcional y/o adicionado. CAT, CATERPILLAR y logos respectivos, "Caterpillar Yellow", la imagen comercial POWER EDGE, la identidad corporativa y productos que aquí se incluyen y marcas registradas de Caterpillar no podrán utilizarse sin consentimiento.

**Nota:** Para obtener información específica sobre algún producto, consulte el Manual de Mantenimiento y Operaciones de Caterpillar correspondiente. Algunos equipos que se muestran en esta guía pueden incluir opciones de posventa no fabricados o probados por Caterpillar.

ISBN: 978-1-939945-13-6

QSBQ1705

© 2013 Caterpillar Inc. - Derechos reservados.

# ÍNDICE

<b>Unidad 1:</b>	LOS PRINCIPIOS BÁSICOS	
	DE LA COMPACTACIÓN DE SUELOS	8
<b>Unidad 2:</b>	TIPOS Y CLASIFICACIONES DE SUELOS	30
<b>Unidad 3:</b>	FÍSICA DE COMPACTACIÓN	38
<b>Unidad 4:</b>	APLICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD	58
<b>Unidad 5:</b>	COMPACTACIÓN INTELIGENTE	90
	APÉNDICE	112
	GLOSARIO DE TÉRMINOS	118

# PREFACIO

Los materiales del suelo siempre han sido los materiales de construcción de mayor abundancia en el mundo. Desde la época en que los romanos los utilizaban para construir carreteras hasta la construcción de presas en la actualidad se ha visto que las operaciones adecuadas de compactación están relacionadas con el rendimiento de los rellenos y edificaciones que se construyen sobre ellos. Hoy en día los proyectos como carreteras, terraplenes, presas, rellenos estructurales y declives requieren operaciones de compactación controlados para asegurar que se cumplan con los criterios de calidad del diseño. Cuando no se logra la calidad en la compactación durante la construcción, los costos por reparaciones durante la vida útil de lo construido llegan a exceder los costos de la construcción inicial

Los materiales del suelo no solo son los más abundantes, sino también los más variables. El tamaño y forma de las partículas, mineralogía, contenido de humedad, mezclas y el tiempo contribuyen con la variabilidad de los materiales. Esta guía describe el origen de la variabilidad y se enfoca en la selección del equipo adecuado para lograr operaciones de compactación efectivas y productivas. Tanto las prácticas para seleccionar el equipo de compactación como los procesos para colocar el material se han basado en gran medida en reglas de oro (dedo) o en lo que se ha estado trabajando en el pasado. Sin embargo, debido a los tiempos de construcción tan acelerados y tendencia

hacia la obtención de resultados con base en las especificaciones, las operaciones de compactación, a pesar de ser una pequeña parte del costo total de la construcción, son cruciales para que el proyecto sea un éxito.

Esta guía describe los principios de los procesos de compactación, selección de unidades compactadoras adecuadas y las recientes tecnologías que evalúan la calidad de los trabajos con el objeto de optimizar el tiempo de compactación y controlar los costos del proyecto. La guía para la selección de unidades compactadoras se basa en tipo de material, grosor de la capa, productividad y criterios de evaluación de la calidad (por ej. compactación relativa, módulo de reacción de la subrasante).

Esta guía resulta particularmente útil para los contratistas quienes desean integrar y utilizar información antes de iniciar los proyectos para poder cotizar precios con base en sitios específicos y generar planes de procesos de compactación enfocados en trabajos bien realizados y a la primera vez, evitando retrabajos costosos y retrasos en la construcción.

Las tecnologías para medir la compactación, como el Control de Compactación Cat®, el "Valor de Medición de Compactación" (CMV) y el "Poder de Tracción de la Máquina" (MDP) permiten vigilar el avance de la compactación en cuanto a: grosor



de las capas, cobertura y número de las pasadas. El CMV es un parámetro por demás conocido el cual permite que las unidades compactadoras se conviertan en aparatos de medición y proporcionen parámetros mecánicos de suelo (por ej., rigidez, resistencia) con base en un análisis de la vibración de la máquina sobre el suelo. El MDP es una tecnología nueva e innovadora de Caterpillar que incrementa las capacidades de estos sistemas.

Con base en los valores mecánicos producidos por la medición de materiales compactados en tiempo real mediante el Sistema Satelital Global de Navegación (GNSS, por sus siglas en inglés) se pueden generar mapas codificados por colores con información de la evaluación de calidad del trabajo. Estos mapas se pueden relacionar con los valores del diseño para asegurar que los materiales compactados cumplan con los criterios de calidad establecidos. Esta característica de evaluar la calidad de la compactación supera por demás al antiguo método de la inspección visual. Las especificaciones de la compactación anteriormente se basaban en las especificaciones de un método que dictaban el proceso; ahora se basan en los resultados de las especificaciones de rendimiento con el 100% de cobertura y en tiempo real utilizando tecnologías integradas. De hecho, las tecnologías de compactación inteligente han provocado que las agencias en todo el mundo reconsideren la evaluación de la calidad de la compactación.

Esta guía combina experiencia y conocimiento que Caterpillar ha adquirido de su compromiso de mejorar su equipo y operaciones de compactación. En esta guía contribuyen muchos contratistas, ingenieros, autoridades reconocidas e investigadores. Tanto las tecnologías de compactación emergentes, especialmente la compactación inteligente integrada, como los métodos para pronosticar los parámetros de operación impulsarán los cambios más significativos en la evaluación de la compactación desde que en 1933 Proctor estableció los estándares para el control de humedad.

Los usuarios de esta guía tienen en sus manos un recurso práctico de los principios de la compactación, información especializada sobre la selección de unidades compactadoras e información sobre cómo optimizar las operaciones de compactación. La implementación de la información integrada en esta guía reducirá riesgos y mejorará la calidad de la compactación.

David J. White, Ph.D.  
Profesor Adscrito  
Universidad del Estado de Iowa





# INTRODUCCIÓN

Todo aquel que desee construir, deberá compactar.

Caterpillar se complace en presentarles esta *Guía de la Compactación de Suelos*. Su finalidad es el de servir como guía de los principios de la compactación de suelos, técnicas de ensayos y procedimientos in situ. Su contenido facilita un enfoque práctico sobre un tema teórico algo complejo. Es el producto de décadas de experiencia en la industria de movimiento de suelos y de conocimientos de numerosas personas quienes han trabajado por años en Caterpillar.

Esta guía es un recurso valioso para cualquier profesional en la construcción, funcionario de gobierno, maestro, estudiante o persona con interés en conocer más acerca de la metodología de la construcción.

Otro recurso valioso a quien consultar acerca de las aplicaciones de movimiento de suelos o compactación es su distribuidor local Cat. Los distribuidores están capacitados por expertos de Caterpillar para facilitarles equipo, servicios y conocimientos para mantenerlo actualizado.



# UNIDAD 1

## LOS PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA COMPACTACIÓN DE SUELOS

La capacidad para analizar la composición del suelo es crucial para el proceso de establecer especificaciones de compactación y obtener la resistencia a la carga requerida.



### [ ¿QUÉ ES COMPACTACIÓN? ]

En términos simples, compactación es el proceso de incrementar mecánicamente la densidad de un material. El suelo se hace más denso cuando los espacios vacíos entre las partículas que lo conforman se reducen. El material suelto con el tiempo se asienta y compacta de manera natural. Cuando se aplican varias fuerzas mecánicas, el tiempo que se requiere para alcanzar tal compactación se acorta de años a horas.

La compactación es un proceso necesario en cualquier tipo de construcción, incluyendo carreteras,

vías férreas, aeródromos, cimientos y áreas de construcción de edificios, oleoductos, presas, canales, alcantarillado, etc. Cualquier suelo que soporte alguna estructura necesitará ser compactado para que la estructura se mantenga estable.

La compactación se logra mediante el uso de una o combinación de las siguientes fuerzas: presión estática, impacto, manipulación y vibración.





**[ ¿POR QUÉ ES IMPORTANTE? ]**

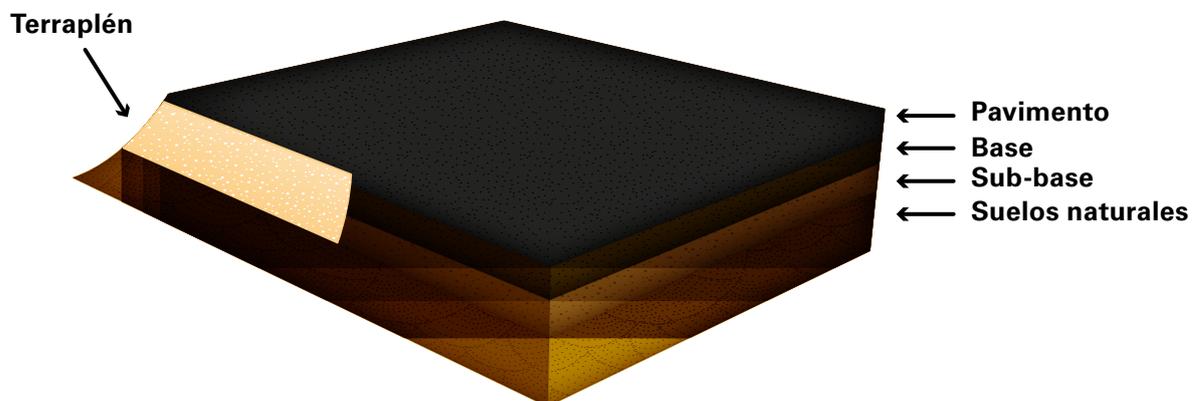
Cualquier material debidamente compactado es capaz de soportar cargas muy pesadas sin deformarse (surcos, grietas, acomodados). El material en el sustrato que soporta tales cargas debe ser denso, de lo contrario se compactará aún más y hará que la estructura se asiente. El material denso es menos permeable, reduciendo así la filtración de agua. La compactación nivela la superficie y revela áreas estructuralmente débiles.

La mejor manera de explicar por qué la compactación es importante es a través de explicar las varias capas que componen una carretera. Cada capa se diseña con un propósito de ingeniería específico y para soportar pesos colocados encima. Cada una deberá construirse con los materiales correctos y el grosor rigidez adecuados. Si una de las capas no es lo suficientemente rígida, la carretera presentará fallas.

La compactación se efectúa en todas las fases de la construcción. La calidad de la compactación tiene un efecto importante en la longevidad de la carretera así como también un efecto profundo en la comodidad – y posiblemente la seguridad – del público que la utiliza.

El elemento menos caro que alarga la vida útil de la carretera es el proceso de compactación. El producir las densidades de cada capa durante el proceso de la construcción cuesta muy poco por metro cúbico. Una densidad conforme a las especificaciones puede traducirse en ahorros importantes en trabajos futuros de mantenimiento y/o reencarpetamiento.

**SECCIÓN TRANSVERSAL DE UNA CARRETERA**



## [ ¿QUÉ ES SUELO? ]

Los suelos son materiales no consolidados compuestos de partículas minerales que pueden contener sustancias orgánicas. Básicamente son depósitos de rocas desintegradas que lentamente se han estado fragmentando por procesos físicos y químicos.

Los procesos físicos incluyen el congelamiento, descongelamiento, rodado, degradación y erosión.

Los procesos químicos forman suelos arcillosos. Las acciones climáticas y las lluvias juegan un papel

importante en la creación de arcillas. La arcilla es diferente de la arena y grava ya que se compone de partículas pequeñas y planas provenientes de una variedad de rocas

La materia orgánica también contribuye con la formación del suelo. Cuando las plantas mueren, sus residuos pasan a formar parte del suelo. Los suelos con alto grado de materia orgánica son regularmente esponjosos y débiles y no los adecuados para soportar estructuras.

## FORMACIÓN DE LOS SUELOS



**1 Suelos residuales**  
Roca pre-existente fragmentada

**2 Depósitos glaciares**  
Materiales acarreados o creados por capas de hielo

**3 Depósitos fluvio-glaciares**  
Materiales transportados por el agua de capas de hielo derretidas

**4 Depósitos fluviales**

**5 Sedimentos de lagos**

**6 Suelos aluviales**  
Suelos de grano fino depositados en plantas y estuarios por corrientes de agua

**7 Sedimentos lavados por oleaje**

**8 Depósitos creados por viento**

**9 Suelos orgánicos**  
Descomposición de la vegetación

**10 Suelos hechos por el hombre**  
Procesados por voladura y trituración

[ TIPOS DE SUELO ]

Los suelos varían debido a su composición química y física. Sin embargo, la ingeniería reconoce seis tipos fundamentales: bloque, guijarro, grava, arena, limo y arcilla.

Los seis tipos de suelo generalmente se clasifican por el tamaño de las partículas que a la vez se determina por medio de un tamiz. Debido a que los detalles precisos de la ingeniería varían según el país, los tamaños de los tamices generalmente

se definen por un sistema desarrollado por una de estas dos fuentes: la Organización Internacional para la Estandarización (ISO, por sus siglas en inglés) [www.iso.org] o la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) [www.astm.org]. A pesar de no coincidir con precisión, ambos sistemas son muy similares. Los porcentajes de suelos muy finos se clasifican con tamices y determinan utilizando la prueba del hidrómetro (Consultar la página 14.)

TIPOS DE SUELO



Bloque



Guijarro



Grava



Arena

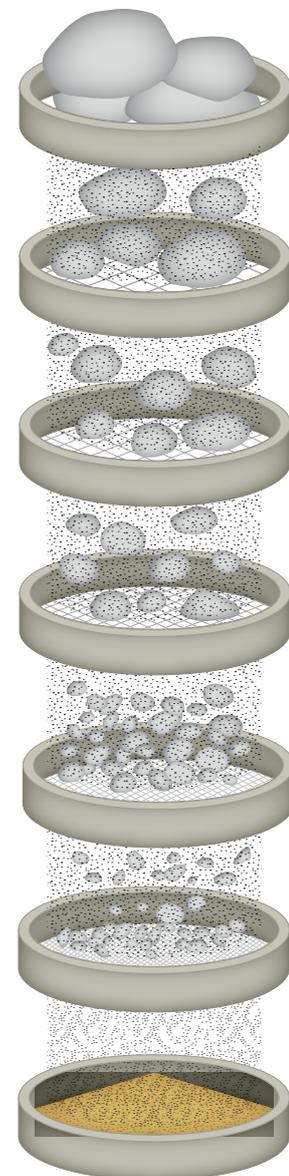


Limo

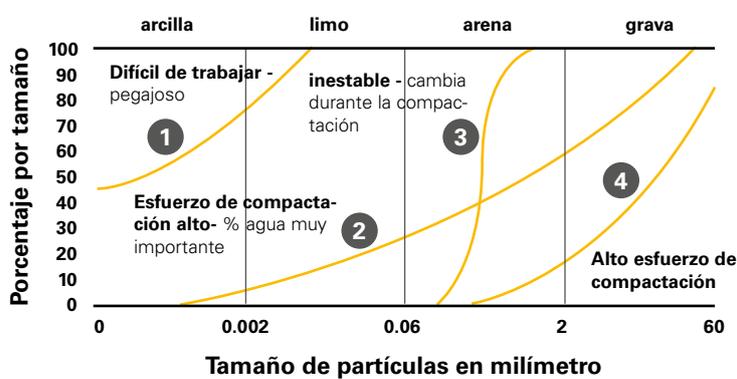


Arcilla

PRUEBA CON TAMIZ



DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULAS



- 1 Limo-arcilla
- 2 Grava-limo
- 3 Arena uniforme
- 4 Grava-arena

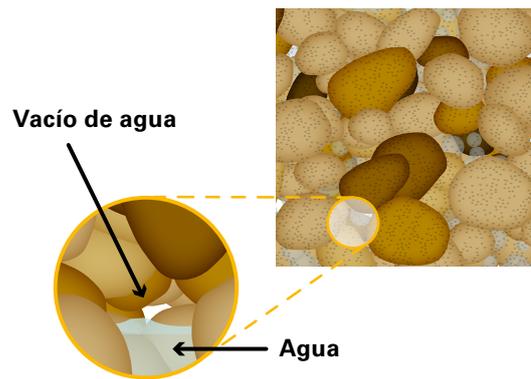


Los suelos naturales o “nativos” – aquellos que yacen naturalmente en el suelo – variarán de una ubicación a la otra. Por ejemplo, un material sólido nunca es 100% arcilla o arena; siempre habrá pequeños porcentajes de otros tipos de suelo presentes. Los mejores materiales para la construcción normalmente se componen de diferentes tipos de suelo, dependiendo de las características del diseño.

Los ingenieros geotecnistas diseñan mezclas para crear estas características mediante porcentajes específicos de cada tipo de suelo. Los tipos de suelo no presentes en el suelo natural se agregan proporcionalmente y mezclan para diseñar un suelo. Estos aditivos normalmente se determinan por medio de un análisis económico de suelos.

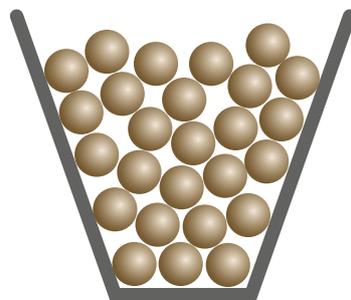
Cuando se examina una muestra de suelo, se puede ver que cada partícula tiene diferente tamaño y forma, así como espacios entre ellas. Estos espacios se llaman “vacíos” y pueden estar ocupados por aire

### VACÍOS DE AIRE/AGUA

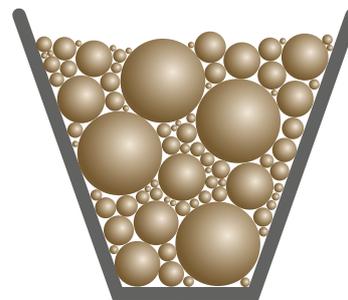


o agua. Cuando el material tiene demasiada agua y aire (debido a la abundancia de vacíos), el suelo es inestable. El proceso de la compactación reorganiza las partículas para minimizar el volumen y tamaño de los vacíos de aire, haciendo que el material sea más denso y estable.

### GRADUACIÓN



**Uniformemente o pobremente graduado**



**Bien graduado**

Las partículas individuales varían en tamaño, aún cuando la variación sea mínima. Al rango de tamaños de partículas se llama “graduación” o a veces “distribución de tamaños de partículas” o “distribución de tamaños de granos”. Al material que consta de granos con cantidades relativamente iguales en tamaño sin granos de tamaño predominante se llama material “bien graduado”.

A los materiales cuyo tamaño de partículas son casi idénticas, tales como arenas aluviales, se les llama “uniformemente graduados” o “pobremente graduados”. Si las partículas del material no tienen uno o más tamaños diferentes, se dice que el material tiene “graduación con espacios”. Un suelo bien graduado se compacta más fácilmente que uno pobremente graduado porque la presencia de variabilidad en tamaño significa que los granos más pequeños caben bien en los vacíos entre los granos grandes.

**[ CUATRO TIPOS DE MATERIALES DE SUELO ]**

A pesar de que es útil conocer la composición exacta del material, resulta más práctico entender cómo reacciona ante la aplicación de varias fuerzas. Los profesionales quienes trabajan con suelos clasifican los materiales en cuatro tipos básicos:

- 1. Cohesivos**
- 2. Semi cohesivos**
- 3. No cohesivos**
- 4. Orgánicos**

Cada tipo reacciona de manera diferente ante la aplicación de fuerzas. La manera de cómo reaccionan dicta qué tan ideales son para efectos de diseñar la construcción así como también los medios a utilizar para trabajar con cada suelo. Como se mencionó anteriormente, los materiales de suelo orgánico no son los ideales para efectos de construcción.

Cuando un material no es el adecuado, se reemplaza o se utilizan varios medios para mejorar sus características. A este proceso se le llama "estabilización". Las soluciones pueden incluir la estabilización química (por ejemplo, la adición de cemento Portland, limo, ceniza volátil o cloruro de calcio) o estabilización mecánica, la cual incluye la adición de agregados o uso de geosintéticos para reforzar el suelo.

**TIPOS DE MATERIALES**



Tipo de suelo	Apariencia/tacto	Movimiento de agua	Cuando está húmedo	Cuando está seco
<b>Suelos granulares, arenas finas y limos</b>	Se pueden ver los granos gruesos. Se sienten grumosos al friccionarlos entre los dedos.	Se mezclan cuando se agrega agua y agitan en la palma de la mano. Se separan cuando se dejan de agitar.	Muy poca o nula plasticidad.	La resistencia cohesiva es poca o nula. La muestra se deshace con facilidad.
<b>Suelos cohesivos, mezclas y arcillas</b>	No se pueden ver los granos a simple vista. Se sienten suaves y aceitosos al friccionarlos entre los dedos.	No se mezclan cuando se agita con agua en la palma de la mano.	Plásticos y pegajosos. Se pueden compactar.	Alta resistencia cuando secos. Difícilmente se deshacen. Saturación lenta en agua.

[ **LA IMPORTANCIA DE CONTENIDO DE AGUA** ]

En el proceso de la compactación de suelos el agua es de suma importancia. Las características físicas de cada tipo definen cómo reacciona con la humedad. Por cada material hay un contenido de humedad que maximiza sus propiedades para diseñar cierta compactación. En general, mientras más pequeñas sean las partículas, mayor influirá el agua sobre la compactación.

Es difícil trabajar con el material de un suelo con poco contenido de humedad debido a que sus partículas carecen de la lubricación necesaria para reorganizarlas en un estado más denso. Además, las partículas no tendrán la cohesión suficiente para permanecer en donde se hayan asentado.

La adición de agua mejora la cohesión y lubricación; el exceso de ésta puede ocasionar la saturación. Cuando el suelo se satura los vacíos se llenan con

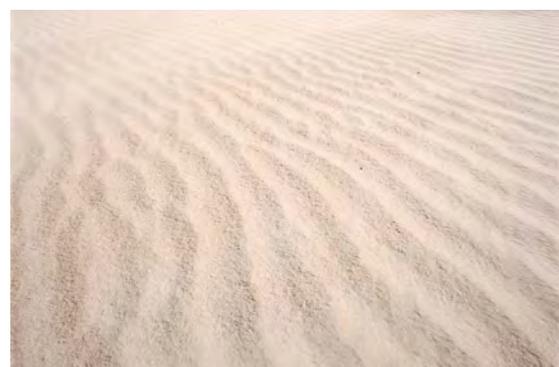


agua y debilitan la capacidad de resistencia a la carga de la estructura. Las partículas también se sobre lubrican y desplazan con facilidad.

Para dar un ejemplo de qué tanto el agua afecta las propiedades del diseño de un suelo, imagine que se encuentra construyendo un castillo de arena en la playa. El agua en la arena proporciona la cohesión suficiente que se requiere para moldear paredes gruesas y torres altas. Ahora imagine que se encuentra construyendo el mismo castillo en un desierto. La aridez de la arena desértica carece de cohesión y dificulta el manejo de los montículos de arena.



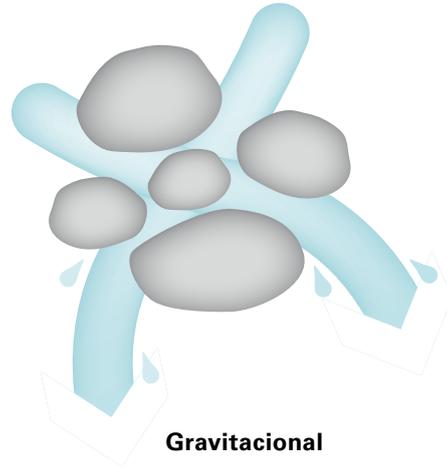
El agua también tiene otros efectos. Debido a que es resistente a la compresión, puede desplazar los materiales del suelo y ocasionar inestabilidad. El agua congelada expande y desplaza el suelo a su alrededor. Al derretirse ocupa menor volumen, crea espacio y permite que haya asentamiento.



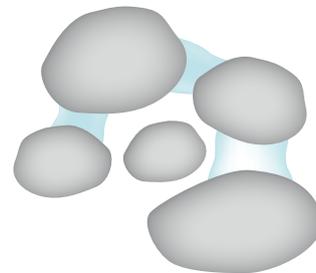
El agua está presente en todos los suelos (en sus estados naturales) y en una de las siguientes tres maneras.

1. El agua gravitacional se desplaza libremente hacia abajo debido a la fuerza de gravedad y se drena del suelo de manera natural.
2. El agua capilar permanece en los poros o vacíos del suelo. Se le considera agua libre y solo se puede eliminar mediante la evaporación o reducción del nivel freático.
3. El agua higroscópica es la que permanece en el suelo después de haber eliminado el agua gravitacional y capilar. Esta agua es retenida por la afinidad física y química de los granos del suelo en forma de una película muy delgada. A este contenido de humedad también se le conoce como "aire-seco". La eliminación de humedad requiere que el suelo se hornee y de esta manera poder determinar el peso seco real.

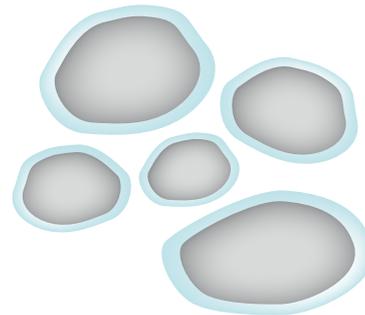
La humedad en exceso sobre lubrica el suelo y lo hace inestable. La poca humedad reduce la cohesión y evita que las partículas se organicen fácilmente para lograr un estado más denso. Para cada tipo de suelo existe un contenido de humedad ideal para alcanzar la máxima densidad posible por medio de la cantidad adecuada de energía de compactación. El ensayo Proctor se desarrolló como medio para definir el contenido óptimo de humedad con base en los esfuerzos de compactación seleccionados.



**Gravitacional**



**Capilar**



**Higroscópico**



## [ EL ENSAYO PROCTOR ]

Siempre se ha entendido la importancia que la compactación de la base y sub-base tienen. Pero no fue sino hasta en 1933 que Ralph R. Proctor de la Oficina de Servicios de Agua en Los Ángeles desarrolló un método estandarizado para determinar el contenido óptimo de humedad en el material y su correspondiente densidad seca máxima. El Ensayo Proctor utilizaba un ariete operado manualmente para compactar tres capas de suelo colocadas en un cilindro confinado.

El procedimiento Estándar determina el contenido óptimo de humedad en un material que permita producir la densidad seca máxima mediante la aplicación de fuerzas de compactación. El resultado obtenido se utiliza para crear especificaciones de la compactación en la obra. Debido a que las condiciones en campo no reúnen las condiciones ideales del laboratorio, a la compactación se le asigna un porcentaje de la densidad seca que se determina en el laboratorio. Tal porcentaje varía entre el 90 y el 100 por ciento.

Los Ensayos Modificados también se utilizan en relación con estructuras que requieren mayor resistencia para cargas extremadamente pesadas o limitar asentamientos. El Ensayo Modificado aplica cuando se requiere cuatro veces más energía que el ensayo Estándar y normalmente produce menor contenido "óptimo" de humedad.



*Kit del Ensayo Proctor en el laboratorio*

### **Excediendo el 100% de densidad seca**

¿Por qué la densidad que se pretende alcanzar excede el 100%? La densidad seca máxima que se establece mediante el Ensayo Proctor no es la densidad máxima en campo para un suelo en particular. La densidad seca del 100% representa la densidad máxima alcanzada en el laboratorio con base en una muestra particular, cantidad específica de fuerza de compactación y contenido ideal de humedad. Los Ensayos Proctor Estándar y Modificado utilizan diferentes pesos y producen diferentes densidades secas para la misma muestra. En campo, los "golpes" provienen de un compactador de suelos grande que aplica una fuerza diferente de la utilizada en los ensayos Proctor. No es raro que en campo se alcancen densidades entre el 100% y el 115% respecto de la densidad seca máxima que el ensayo Proctor arroja. Los ingenieros geotécnicos pueden determinar que se exceda el porcentaje de la densidad producida en el laboratorio según los requerimientos de resistencia a la carga y características del suelo.

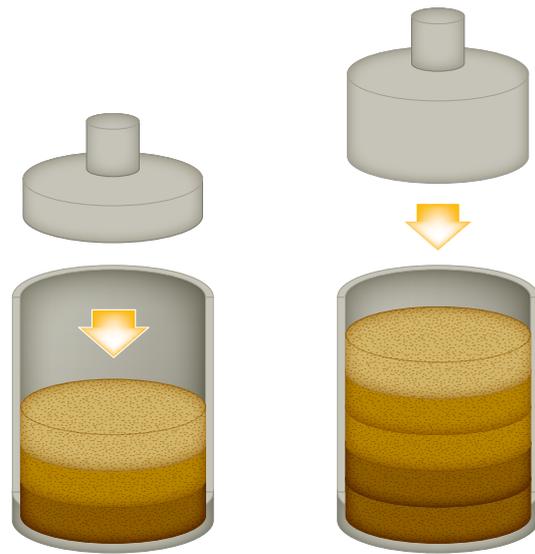
El ensayo Proctor, sea Estándar o Modificado, se efectúa cinco veces con la misma muestra de suelo. Cada ensayo que se efectúa se hace con base en el mismo procedimiento, pero con diferentes contenidos de humedad.

La serie comienza humedeciendo la muestra por debajo del contenido óptimo de humedad probable. Después de compactarla dentro de un envase cilíndrico, se mide el peso húmedo y retira una porción para colocarla en el horno. Cuando la porción queda completamente seca, se pesa nuevamente. La diferencia entre el peso húmedo y mojado produce el contenido de humedad que se expresa en porcentaje de peso seco.

La segunda muestra pasa por el mismo procedimiento (compactar, secar y pesar) pero con más contenido de humedad. Las demás pruebas se procesan de la misma manera pero con mayor contenido de humedad hasta que la unidad de peso húmedo se reduzca o que sea imposible trabajar con el suelo por exceso de humedad.

Los resultados obtenidos en cuanto a la densidad seca y contenido de humedad de cada muestra se trazan hasta formar una curva continua. El punto más alto de la curva representa la densidad seca máxima y el contenido óptimo de humedad para esa muestra.

## ENSAYOS PROCTOR



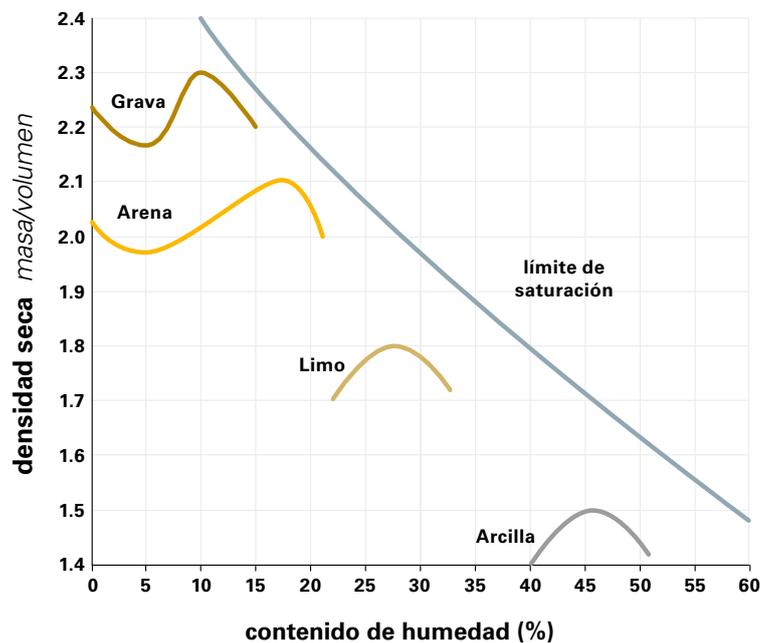
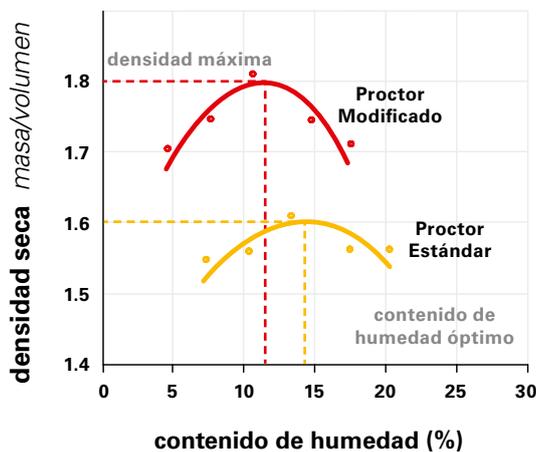
**Estándar**

Cada capa recibe 25 golpes de un martillo de 2.5 kg (5.5 lbs.) a una distancia de 305 mm (12 in.)

**Modificado**

Cada capa recibe 25 golpes de un martillo de 4.5 kg (10 lb) a una distancia de 457 mm (18 in.)

## CURVAS PROCTOR

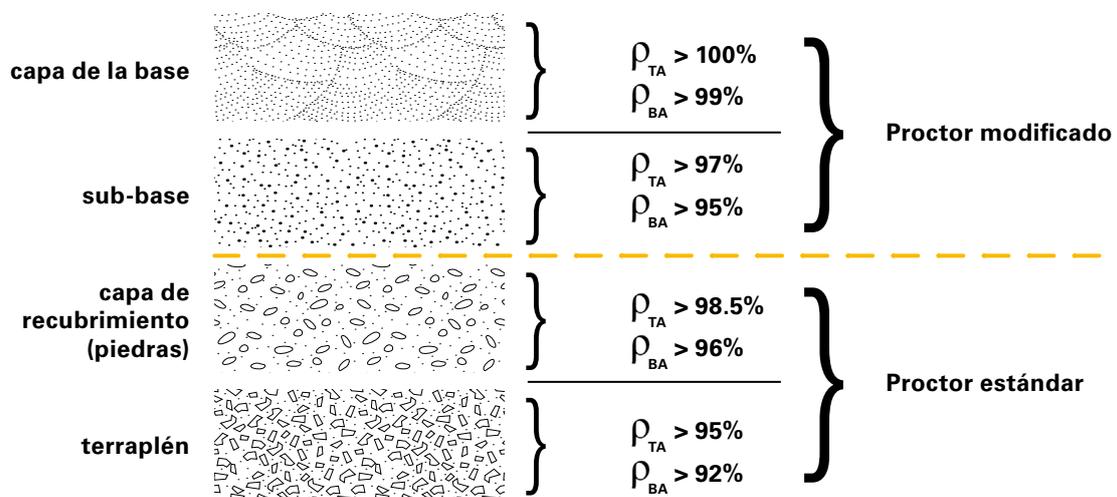


Las pruebas de laboratorio determinan el contenido de humedad que le permita a un material alcanzar su máxima densidad. Las densidades que se pretenden alcanzar en campo se especifican con base en los porcentajes obtenidos en laboratorio para las densidades secas máximas. En general, las densidades requeridas en campo serán 95% del

Ensayo Estándar para terraplenes y hasta 100% del Ensayo Modificado para carreteras. Asimismo el contenido de humedad deberá estar dentro de un rango que determine el laboratorio.

### DENSIDADES A ALCANZAR

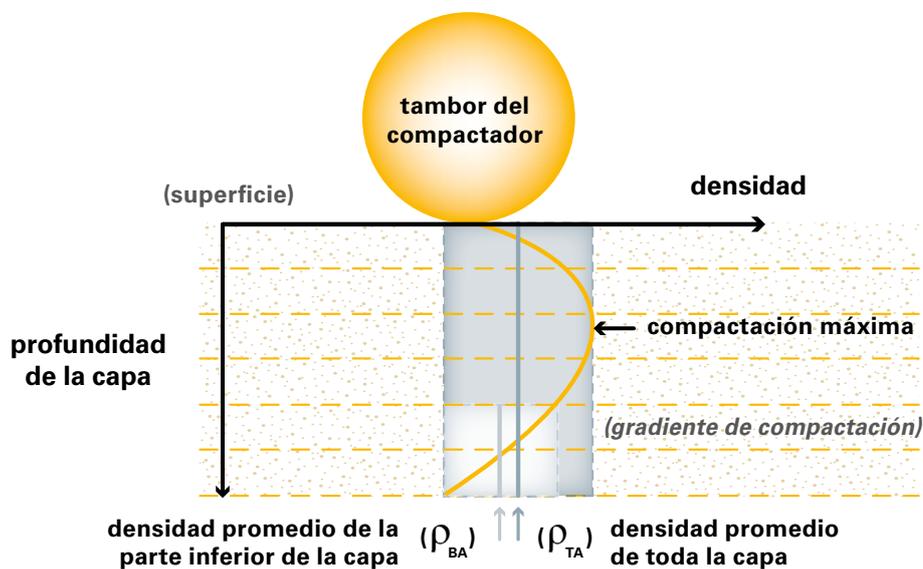
Este ejemplo muestra que a mayor cercanía del material a la superficie, mayor densidad.



$\rho_{TA}$  = Densidad promedio de toda la capa

$\rho_{BA}$  = Densidad promedio de la parte inferior de la capa

Esta imagen de la gradiente de compactación compara la densidad promedio de toda la capa ( $\rho_{TA}$ ) con la densidad promedio de la parte inferior de la capa ( $\rho_{BA}$ ).



## [ PROPIEDADES DEL SUELO ]

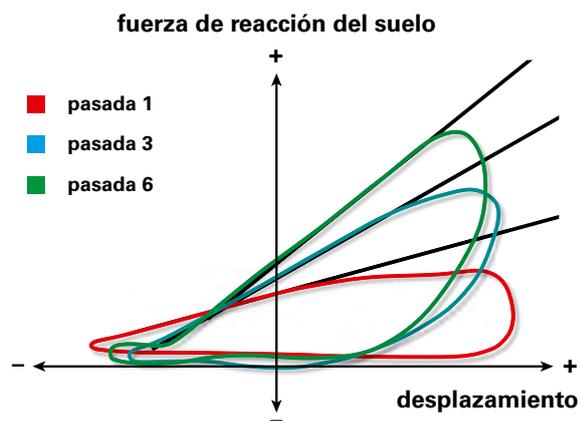
Los ingenieros por lo regular utilizan varios términos para definir las características y propiedades de los suelos. Es sumamente importante entenderlos para poder entender los principios y técnicas de la compactación de suelos.

**Resistencia a la carga** es la propiedad más importante de la estructura de una carretera. En términos más simples, es la capacidad que una estructura tiene para soportar el peso que carga. Regularmente el análisis de la resistencia a la carga se realiza con la ayuda de un camión de volteo con carga (rodado de comprobación) para ver si hace surcos o la prueba de la placa de carga. En la construcción de carreteras se utilizan otras propiedades como el módulo, rigidez y densidad para proporcionar la resistencia de operación a la carga.

**Rigidez** es la capacidad que tiene cierto material para resistirse a la deformación bajo una carga y se calcula dividiendo la tensión entre el desplazamiento. A diferencia del módulo elástico, no se trata de la calidad del material del suelo en sí. La rigidez es la calidad del material en cantidad, forma y composición – qué tanto se deforma la forma del material bajo una carga. Es por esa razón que se acepta la rigidez como una manera válida para calcular la resistencia a la carga de un suelo.



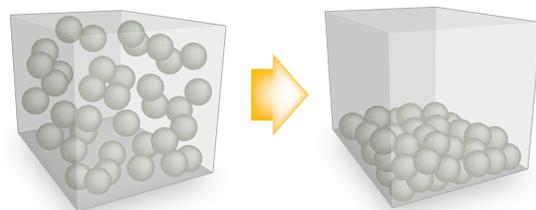
## RIGIDEZ



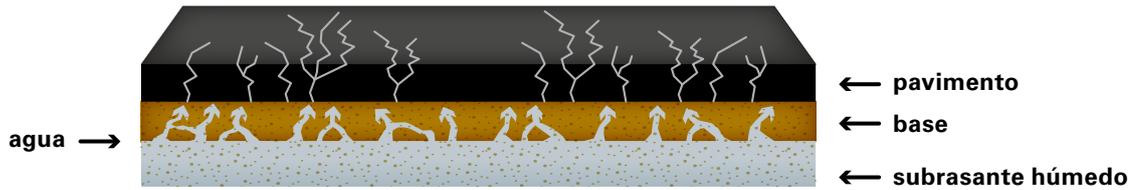
*A mayor inclinación de la curva, mayor la rigidez del suelo*

**Densidad** es lo que resulta de dividir la masa de un material entre el volumen que ocupa. La densidad máxima es el volumen mínimo que la masa de un material en particular puede ocupar. Es decir, en un estado sin vacíos; en una masa completamente sólida. Los suelos se hacen más densos a través de reducirles su volumen mediante la compactación. La densidad normalmente ha sido la propiedad estándar a través de la cual los ingenieros calculan la resistencia a la carga. Sin embargo, debido a que una densidad alta no está relacionada con la deformación y puede ocasionar que ciertos materiales se hagan quebradizos o se degraden, la importancia de la densidad como evaluación primaria de la resistencia a la carga se ha visto disminuida. No obstante, es aún una propiedad necesaria y confiable utilizada para realizar ciertas premisas acerca de la capacidad de soporte de una carretera.

## DENSIDAD



**CAPILARIDAD**



**Capilaridad** es la capacidad que tiene un suelo para forzar el agua hacia arriba o a los lados. La característica que se desea en un material base utilizado como capa entre la subrasante y el pavimento de una carretera es que actúe como barrera capilar evitando el movimiento capilar ascendente del agua desde la subrasante. La base granular también permite que el agua se drene de la subrasante. Los poros o vacíos del suelo

retienen el agua capilar. A esto se le considera agua libre, pero solamente se elimina mediante la disminución del nivel freático, carga pesada sostenida o evaporación. Sin una barrera capilar en la base, el agua atrapada ablanda y expande la subrasante haciendo que la superficie pierda el soporte adecuado y que la carretera se deteriore prematuramente.

**COMPRESIBILIDAD**

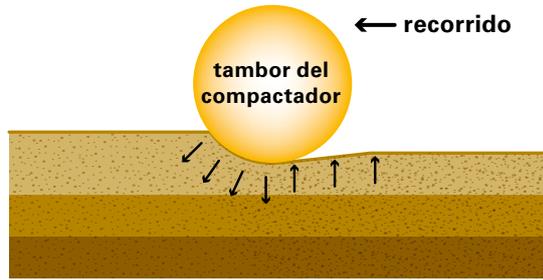


**Compresibilidad** es el índice de la reducción en volumen de un suelo al aplicársele una fuerza. Los suelos con alta compresibilidad tienen partículas que fácilmente se organizan para reducir el espacio de vacíos de aire o agua. En condiciones húmedas, los suelos arcillosos regularmente tienen mayor compresibilidad que los suelos granulares

pero tienen menor permeabilidad que los hace que se drenen y compriman muy lentamente. Cuando repentinamente reciben una carga, por ejemplo, una carga sobre ruedas, la presión del agua se acumula en suelos de grano fino y produce una compresibilidad incrementada.

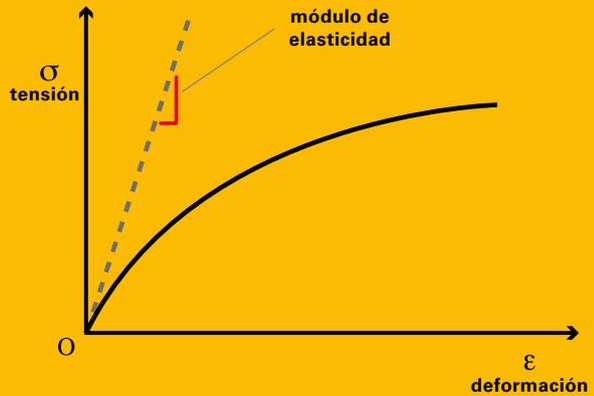
**Elasticidad** es la tendencia que tiene el suelo para deformarse y retornar a su forma original o casi original después de que se le retira una carga de compresión. La elasticidad puede ser una característica deseable en suelos que soportan fluctuaciones de cargas sin acumular una deformación permanente. Sin embargo, el rendimiento de las carreteras cuyas bases o subrasantes son altamente elásticas es pobre si el módulo de elasticidad es muy bajo, produciendo tensiones altas dentro de sus capas de pavimentación. La estabilización química y mecánica regularmente se utiliza para controlar el comportamiento elástico de los suelos y la base. Los suelos orgánicos son altamente elásticos, pero su módulo de elasticidad es bajo.

## ELASTICIDAD

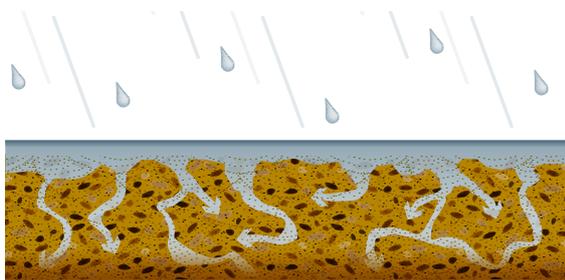


### Módulo de elasticidad:

Este es el cálculo de la relación de una tensión aplicada a la deformación de un material. Se le considera la calidad de la muestra de un suelo en particular y puede variar conforme cambia la composición del material. El módulo frecuentemente se utiliza para obtener una indicación de la resistencia a la carga del material del suelo. El grosor de la capa del pavimento normalmente se basa en la evaluación del módulo subyacente de elasticidad.



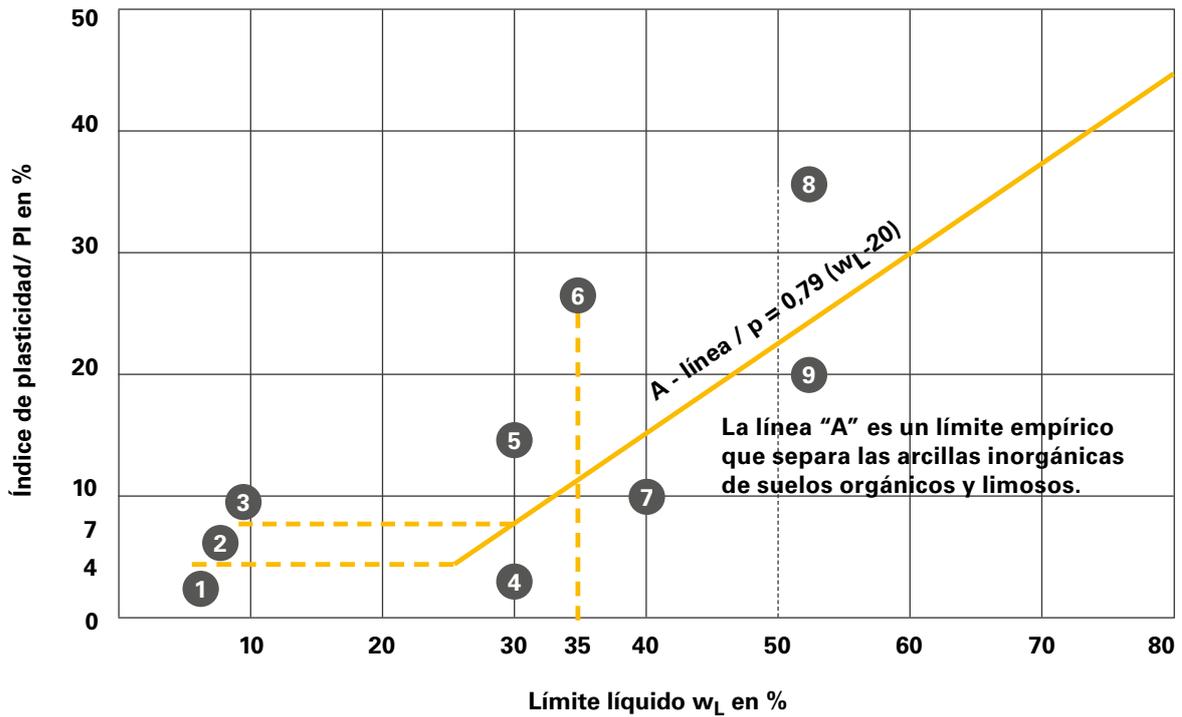
## PERMEABILIDAD



**Permeabilidad** es la facilidad con la que el agua fluye a través del suelo. No es lo mismo que capilaridad, que es la capacidad del suelo para absorber agua. La textura del suelo, graduación y grado de compactación influye la permeabilidad del suelo. La permeabilidad es el parámetro más variable con valores que varían más de 10 órdenes

de magnitud. Usualmente los suelos de grano grueso son más permeables que los de grano fino debido a que los de grano grueso tienen más vacíos entre sus partículas.

PLASTICIDAD

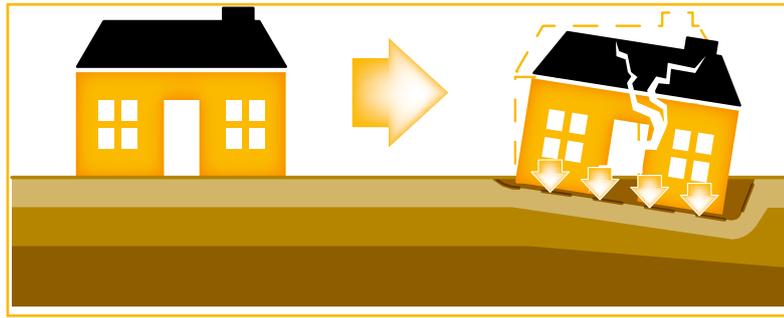


- 1 Mezcla de arena-limo
- 2 Rango intermedio
- 3 Mezcla arena-arcilla
- 4 Limos de plasticidad ligera
- 5 Arcillas de plasticidad ligera
- 6 Arcillas de plasticidad media
- 7 Limos con aditivos orgánicos y limos organogénicos y limos de plasticidad media
- 8 Arcillas con plasticidades diferentes
- 9 Arcillas con aditivos orgánicos y limos de diferentes compresiones

**Plasticidad** se refiere al grado de adhesividad y naturaleza deformable del un suelo. La medición de la plasticidad se expresa como Índice de Plasticidad (PI). Muchos suelos arcillosos tienen un PI alto,

son bastante compresibles y tienen un alto grado de adhesividad. Un suelo con cero PI no es cohesivo o no plástico. El contenido de humedad también afecta su PI.

## ASENTAMIENTO

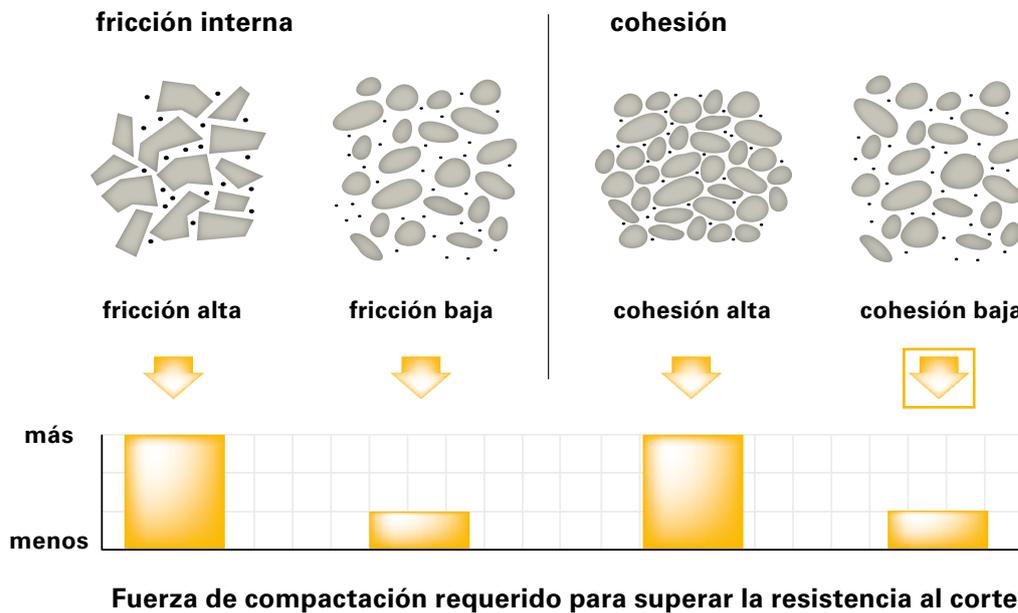


asentamiento

**Asentamiento** es la reducción de la elevación de la superficie por la consolidación del material de relleno. El asentamiento por lo regular es el resultado de una compactación inadecuada. Las partículas del suelo mal compactadas con el

tiempo se reorganizan de manera natural y reducen el espacio disponible para aire o agua. El resultado es el asentamiento el cual está directamente relacionado con la reducción del volumen de vacíos.

## LA RESISTENCIA AL CORTE DEPENDE DE ...



**Resistencia al corte** es la resistencia que las partículas del suelo tienen para deslizarse sobre sí mismas cuando se les aplica una fuerza (por ejemplo, vibración o fuerza de compactación). La resistencia al corte es el resultado de una fricción interna (resistir el deslizamiento sobre sí mismas)

y la cohesión (atracción entre sí). Las partículas de forma irregular son más resistentes al corte que las partículas con forma regular. A mayor resistencia al corte, mayor fuerza de compactación que se requerirá para alcanzar la densidad.

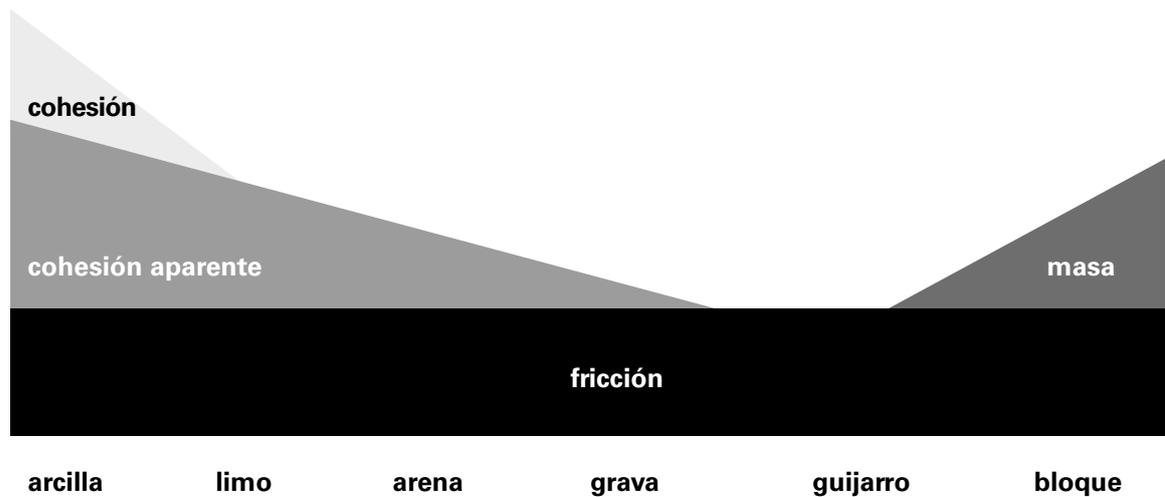
## ENCOGIMIENTO



**Encogimiento o acortamiento visible** es una indicación de que el suelo se compone de grano fino como la arcilla. El ciclo de encogimiento o acortamiento se produce por la liberación y acumulación de humedad dentro del suelo.

Este tipo de suelos no permite cimientos sólidos por los cambios tan constantes en volumen que pueden provocar falla estructural en edificios o pavimentos los cuales dependen de un soporte estable.

## COMPACTIBILIDAD



**Compactibilidad:** Al proceso de cambiar el suelo de estado blando a denso se le denomina compactibilidad. La compactibilidad se puede cuantificar por la diferencia entre la densidad final menos la densidad inicial dividida entre la densidad inicial. A mayor índice de compatibilidad, más fácil o rápidamente se dará el cambio en la densidad por el esfuerzo de compactación aplicado. Los factores que afectan la compatibilidad incluyen

la graduación del suelo (los suelos bien graduados tienen mayor compactibilidad que los suelos con espacios), contenido de humedad, resistencia al corte (resistencia a la deformación), poder de compactación y método. Entender los factores que contribuyen con el incremento de la compactibilidad garantizará la selección adecuada del equipo y operaciones de compactación eficientes.

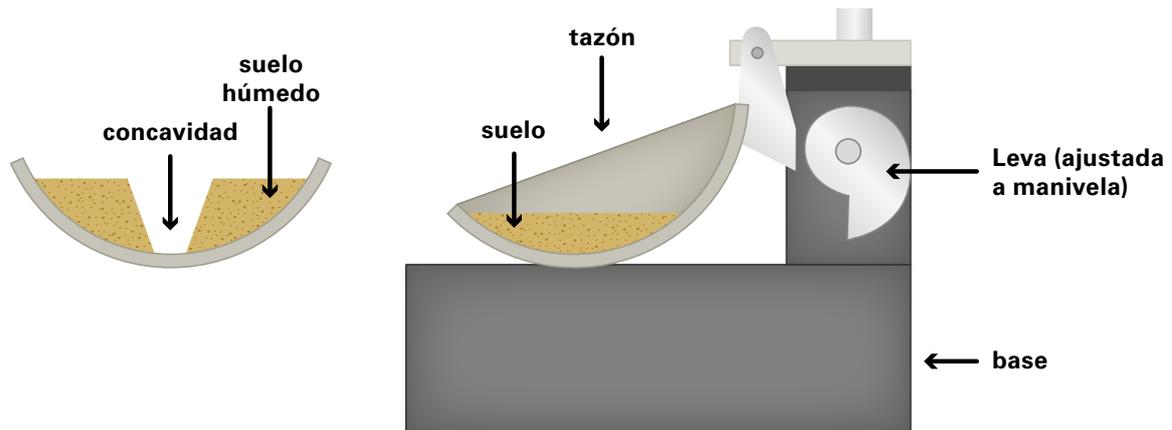
## [ LÍMITES DEL SUELO ]

El grado en que el contenido de humedad afecta la compactabilidad de un suelo cohesivo (arcilla) puede entenderse mejor si se examinan los límites del suelo.

Albert Atterberg, un químico sueco, fue el primero en desarrollar ciertos límites de la consistencia del suelo:

Límite Líquido, Límite Plástico, Índice de Plasticidad y Límite de Encogimiento. Los límites referidos como Límites Atterberg son las bases para diferenciar la plasticidad alta, ligera y no plástica en los materiales.

## PRUEBA DE LÍMITE DE LÍQUIDO



aparato para probar el límite líquido simple

### Límite líquido (LL)

El contenido de humedad en que el suelo pasa de estado plástico a líquido es el Límite Líquido. Esto significa que hay suficiente humedad en el suelo para abatir la fricción interna y cohesión.

Existe una prueba sencilla para determinar el Límite Líquido de un suelo. Se toma una muestra húmeda de suelo, se coloca dentro de un tazón pequeño y se aplasta para que la superficie quede nivelada. Luego se le hace una concavidad profunda y se le dan pequeños golpecitos en la parte inferior del tazón (10-30 veces) tratando de observar la concavidad. Si las caras de la concavidad conservan la misma distancia de separación, saque la muestra, agréguele más agua y repita el proceso. Cuando las caras de la concavidad se junten a una distancia de 15 mm ( $\frac{1}{2}$ "), la muestra se ha vuelto algo líquida y ha llegado a su Límite Líquido.

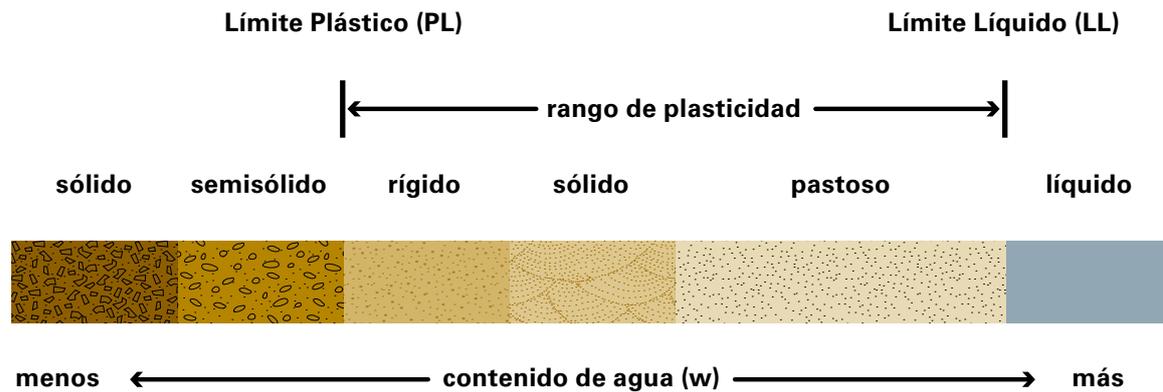
Los LL altos se asocian a suelos con compresibilidad alta. Regularmente las arcillas tienen LL altos; los suelos arenosos tienen LL bajos.

### Límite Plástico (PL)

Esta condición se presenta cuando el suelo cambia de estado semi sólido a plástico. Cuando contiene justo la cantidad suficiente de humedad, se puede enrollar y formar hebras de aproximadamente 3 mm ( $\frac{1}{8}$ ") de diámetro sin romperse.

El PL del suelo es importante ya que representa el contenido de humedad en que las partículas se deslizan sobre sí mismas y tienen la cohesión adecuada. Es el punto donde se presenta la mejor compactación con suelos altamente arcillosos. La resistencia del suelo se reduce rápidamente conforme el contenido de humedad excede el Límite Plástico.

## ÍNDICE DE PLASTICIDAD (PI)



### Índice de Plasticidad (PI)

Esta es la diferencia numérica entre el Límite Plástico y el Límite Líquido de un suelo. Los suelos con PI altos son más compresibles y tienen mayor cohesión. El suelo es poco o nada cohesivo cuando el contenido de humedad está en el Límite Líquido, pero es altamente cohesivo cuando el contenido de humedad está en el Límite Plástico. Por lo tanto el PI ofrece un medio para calcular la compresibilidad y cohesión de un suelo.

El PI también está relacionado con la permeabilidad. A mayor PI, menor permeabilidad – y a menor PI, mayor permeabilidad. En muchas construcciones donde se trabaja con suelos con alto contenido de arcilla, las especificaciones requieren material con cierta graduación, LL máximo y PI máximo.

### Límite de Encogimiento (SL)

Un suelo que se seca por debajo del Límite Plástico, se encoje y hace quebradizo. En el contenido de humedad en que el cambio de volumen de la muestra se detiene, se determina el Límite de Encogimiento. El SL contiene la mejor humedad con la que se compactan muchos suelos no plásticos (arenosos). El suelo que contiene suficiente arcilla para elevar el PI se compactan mejor entre el SL y el PL.



## Unidad 2

# TIPOS Y CLASIFICACIONES DE SUELOS

Cuando sea factible, las pruebas de suelo de laboratorio son la mejor opción para clasificar suelos. Cuando no lo sea, se podrán efectuar una o más pruebas de campo para ayudarle a identificar suelos y determinar la estrategia de compactación.



[ SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS ]

Actualmente existen diversos sistemas de clasificación de suelos utilizados en todo el mundo. Todos utilizan términos como grava, arena, limo y arcilla, pero con sistemas numéricos y alfabéticos

ligeramente diferentes. El propósito de la clasificación de suelos es crear estándares mediante los cuales se puedan identificar los suelos y sus características de ingeniería.

**Sistema de clasificación de suelos de AASHTO –**

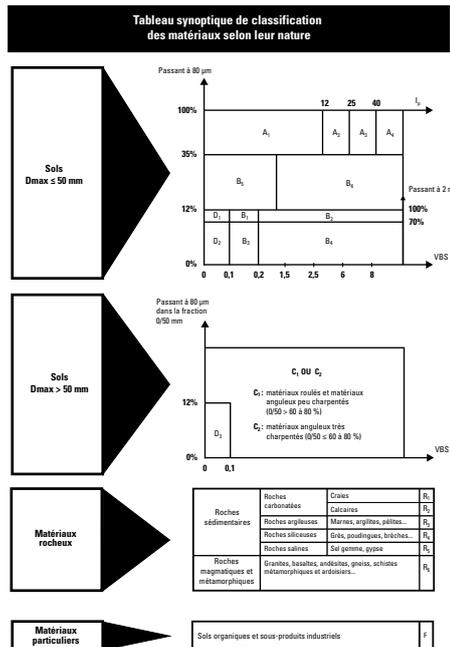
El sistema de clasificación de suelos ampliamente utilizado es el de la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y Transporte (AASHTO, por sus siglas en inglés) el cual se basa en el rendimiento de los suelos para la construcción de carreteras. El sistema divide materiales en siete grupos principales con algunos subgrupos. Los grupos están clasificados en dos categorías principales: materiales granulares y materiales limosos-arcillosos.

AASHTO CLASSIFICATION OF HIGHWAY SUBGRADE MATERIALS (with suggested subgroups)										
General Classification	Granular Materials (35% or less passing #200)						Silt-Clay Materials (more than 35% passing #200)			
	A-1		A-3	A-2			A-4	A-5	A-6	A-7 A-7.5 A-7.6
Group Classification	A-1-a	A-1-b		A-2.4	A-2.5	A-2.6				
Sieve Analysis Percent Passing:	# 10 0-50	# 40 0-30	# 200 0-15	51-100 0-10	0-35	0-35	0-35	38-100	38-100	38-100
Characteristics of Fraction Passing #40:										
Liquid Limit					0-40	41+	0-40	41+	0-40	41+
Plasticity Index		0-6	N.P.		0-10	11+	0-10	11+	0-10	11+
Group Index		0	0	0	0	0-4	0-8	0-12	0-16	0-20
Usual Types of Significant Constituent Materials	Stone Fragments Gravel and Sand		Fine Sand	Silty or Clayey Gravel and Sand			Silty Soils		Clayey Soils	
General Rating as Subgrade	Excellent to Good						Fair to Poor			

Por favor consulte las gráficas de tamaño completo en el apéndice.

**Sistema francés de clasificación de suelos –**

Este sistema clasifica materiales en clases y subclases con base en el análisis mecánico de atributos, incluyendo la distribución de granos por tamaño, plasticidad y equivalente de arena.



Sistema alemán de clasificación de suelos –

DIN18196 clasifica en grupos todos los materiales de suelo utilizados en la construcción con base en el tamaño de las partículas según DIN4022, proporciones de masa, plasticidad y la presencia de componentes orgánicos y calcáreos. Generalmente las partículas gruesas y finas se califican de manera diferente debido a que las gruesas constan de un criterio de distribución por tamaño de partícula y las finas de un criterio de plasticidad.

Hauptgruppe	Korngrößenanteil < 0,06 mm	Korngrößenanteil > 2,0 mm	Gruppe (abgelesen)	Gruppe (detailliert)	Kurzzeichen, Gruppenzusatz
Kiesblöckiger Boden	< 5	< 40	Kies	Einphasische Kies	GE
				Mittelphasische Kies-Sand-Gemische	EW
				Trennphasenart gemauerte Kies-Sand-Gemische	EL
Sandblöckiger Boden	5 bis 40	< 40	Sand	Einphasische Sande	SE
				Mittelphasische Sand-Kies-Gemische	EW
				Trennphasenart gemauerte Sand-Kies-Gemische	SL
			Kies-Schluff	5 bis 15 Gew.-% < 0,06 mm	SU
				15 bis 40 Gew.-% < 0,06 mm	SU*
				5 bis 15 Gew.-% < 0,06 mm	ST
Schluffblöckiger Boden	5 bis 40	< 40	Sand-Schluff	5 bis 15 Gew.-% < 0,06 mm	SU*
				15 bis 40 Gew.-% < 0,06 mm	SU
			Sand-Ton	5 bis 15 Gew.-% < 0,06 mm	ST
				15 bis 40 Gew.-% < 0,06 mm	ST*
			Schluff	Leichte plastische Tonen W <sub>c</sub> < 35	UL
				Mittelschwere Tonen W <sub>c</sub> < 35 bis 50	ULM
Tonblöckiger Boden	< 40	–	Ton	Leichte plastische Tonen W <sub>c</sub> < 35	TL
				Mittelschwere Tonen W <sub>c</sub> < 35 bis 50	TM
				Mittelschwere Tonen W <sub>c</sub> < 35	TL
Organischer Boden	< 40	–	Nicht braun und schwach	Organische Schluffe W <sub>c</sub> < 35 bis 50	OU
				Organische Tonen W <sub>c</sub> < 35	OT
				Erb bis gemischtkörnige Böden mit humosen Beimengungen	OH
Organischer Boden	< 40	–	Braun- und schwach	Erb bis gemischtkörnige Böden mit kalkigen, kesseligen Bindungen	OK
				Nicht bis mäßig verwitterte Torfe	HN
				Schwamm Torfe	HT
Aufkantung	–	–	–	Müden (Fauchhammer)	F
				Auftreibung aus Fremdstoffen	A

\* Eine Aufkantung ist eine unter menschlicher Einwirkung entstandene Schichtung aus natürlichen Böden oder Fremdstoffen.

Sistema Unificado de Clasificación de Suelos –

El USCS (por sus siglas en inglés) es un método de clasificación de suelos ampliamente utilizado en proyectos de construcción. El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EUA y el Buró de Rehabilitación de Suelos de los EUA desarrollaron este sistema el cual utiliza la textura como término descriptivo.

USCS SOIL CLASSIFICATION SYSTEM			
SOIL FRACTION	SYMBOL	SIZE RANGE	
Boulders	None	Greater than 12"	
Cobbles	None	75 mm (S") to 12"	
1- Coarse Grained Soils:			
Gravel	G	75 mm (S") to #4 Sieve (4.25 mm)	
Course Gravel		75 mm to 19 mm	
Fine Gravel		#4 Sieve to 19 mm	
Sand	S	#4 Sieve to #200 Sieve (0.075 mm)	
2- Fine Grained Soils:			
Fines		Less than #200 Sieve	
Silt	M	Use Atterberg Limits	
Clay	C	Use Atterberg Limits	
3- Organic Soils			
Peat	PT	Visual Identification	
Gradation Symbols			
Well-graded	W	High LL	H
Poorly-graded	P	Low LL	L

Sistema de clasificación de suelos del Reino Unido –

El sistema de clasificación Estándar Inglés (BS, por sus siglas en inglés) es un protocolo para identificar la composición de suelos. El suelo lo clasifica ya sea en grueso o en fino, conforme al tamaño de las partículas. Los suelos granulares se clasifican conforme a la distribución de partículas según su tamaño y los finos en subgrupos según sus plasticidades.

SOIL GROUPS		SUB-GROUPS and in-laboratory classification				
GRAVEL and SAND may be qualified sandy GRAVEL and gravelly SAND where appropriate		GROUP SYMBOL	SUB-GROUP SYMBOL	FINES % < 0.05 mm	LIQUID LIMIT	
GRAVEL SOILS less than 20% of the material is finer than 0.075 mm	GRAVELS More than 75% of the material is finer than 4.75 mm	Slightly silty or clayey GRAVEL	G	DW	0 to 5	
		Silty GRAVEL	GF	SP, SPg		
		Clayey GRAVEL	G-C	GM, GPM	5 to 15	
		Very silty GRAVEL	GF	GC, GPC	15 to 35	
		Very clayey GRAVEL	GF	GC, GCL, GCL, GCV, GCS, GSC		
		Slightly silty or clayey SAND	S	DW	0 to 5	
	SANDS More than 75% of the material is finer than 0.075 mm	Silty SAND	S-F	SM, SPM	15 to 35	
		Clayey SAND	S-C	SC, SPC		
		Very silty SAND	SF	SM, etc.	15 to 35	
		Very clayey SAND	SF	SC, SCL, SCL, SCH, SCS, SCS		
		FINE SOILS more than 20% of the material is finer than 0.075 mm	Gravelly SILT	MG	MCL, etc.	
			Gravelly CLAY	CG	CL, CH, CHC, CVC, CSC	< 35 35 to 70 70 to 90 > 90
Sandy SILT	MS		MCL, etc.			
Sandy CLAY	CS		CL, etc.			
SILT (M SOIL)	M		ML, etc.			
CLAY	C		CL, CI, CH, CV, CE	< 35 35 to 70 70 to 90 > 90		
ORGANIC SOILS	Description letter 'O' suffixed to any group or sub-group symbol		Organic matter in significant amount e.g. OMG - organic silty of high LL			
PEAT	Pt - consists predominantly of plant remains (fibrous or amorphous)					

Classification v1.00 Sept 2010  
 Primary Letter: G = Gravel, S = Sand, M = Silt, C = Clay, O = Organic Soil, Pt = Peat  
 Secondary Letter: W = Well graded, P = Poorly graded, M = With non-plastic fines, C = With plastic fines, L = Of low plasticity (LL < 50), H = Of high plasticity (LL > 50)

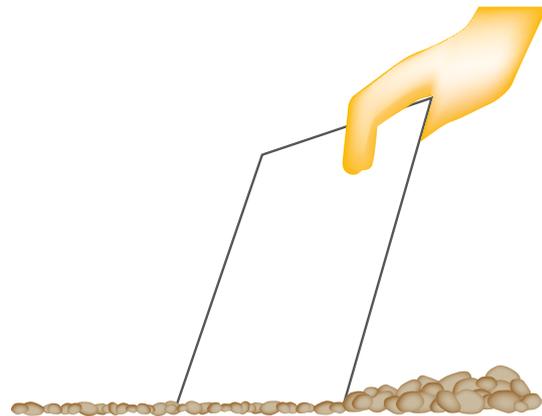
## [ CLASIFICACIÓN DEL SUELO EN CAMPO ]

Los sistemas de clasificación requieren mediciones de laboratorio tales como: análisis granulométrico por tamizado o prueba de índice de plasticidad. No obstante, se pueden realizar pruebas simples

en campo para clasificar los suelos cuando no haya algún laboratorio disponible. Las pruebas se utilizan para determinar la graduación, plasticidad y dispersión.

**Distribución de graduación/partículas** – Para hacer la prueba de graduación de un suelo seco, esparza una muestra sobre una superficie plana. Utilice un pedazo de papel rígido o cartón como rastrillo para separar las partículas más grandes. Estime el porcentaje de partículas que excedan 5 mm (3/16") y el porcentaje de las finas (granos individuales tan pequeños difíciles de ver a simple vista). Estime también si el tamaño de las partículas más grandes es uniforme (mal graduado) o si constan de granos grandes, medianos y pequeños (bien graduados).

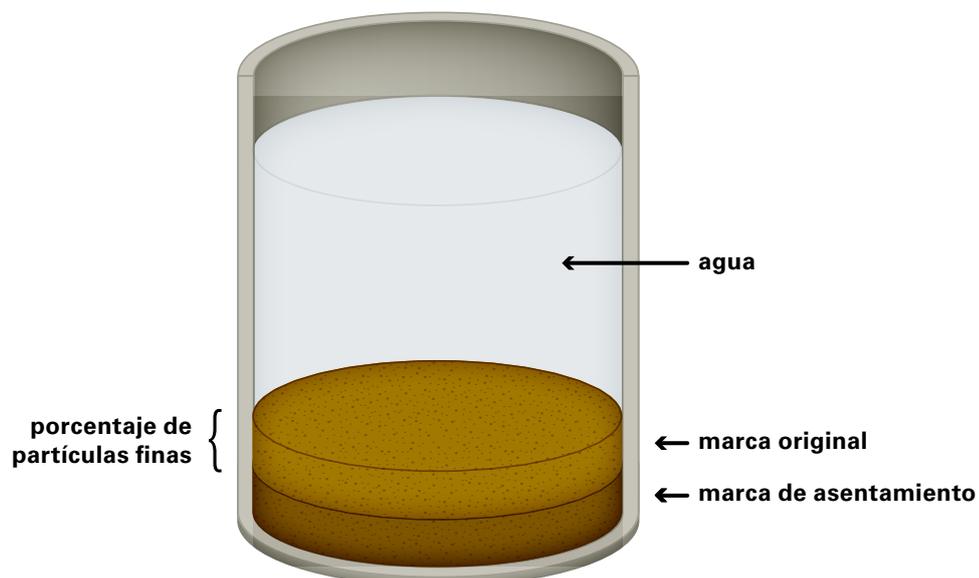
### PRUEBA DE GRADUACIÓN



Si el suelo está muy húmedo, rompa un terrón con la ayuda de un lápiz y estime los porcentajes conforme al método de suelo seco. Para establecer los porcentajes de los finos, llene un vaso transparente con 3 mm (1/8") de agua. Agregue una muestra de suelo hasta llenar ¼ del vaso. Vierta agua hasta que la muestra quede apenas cubierta.

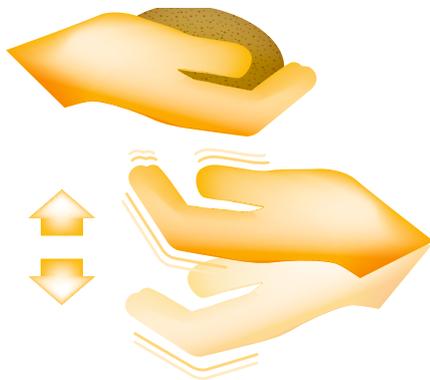
Marque este nivel con una liga. Llene el vaso ¾ con agua y mezcle vigorosamente. Déjelo reposar 1 minuto y medio para que se asiente y marque la altura de la muestra que se asentó. La diferencia entre estas dos marcas representa el porcentaje de los finos.

### PORCENTAJE DE PARTÍCULAS FINAS



**Plasticidad de suelos de granos finos** – Puede realizar una o más pruebas de campo para estimar la plasticidad del suelo.

**PRUEBA DE AGITACIÓN**

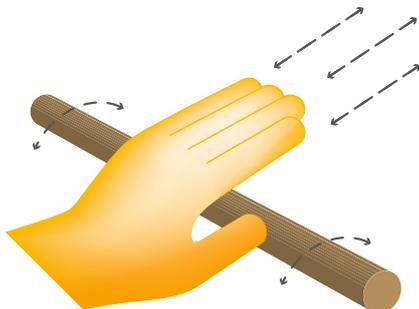


- **Prueba de agitación** – Tome un terrón de grano fino y amáselo tratando de romper las partículas de grano grandes lo más que pueda. Agregue agua poco a poco y amase hasta que comience a ponerse pegajoso. Tome la bola de lodo sobre la palma de una mano y de golpecitos en el reverso de esa mano con los dedos de su otra mano.

Si la superficie de la bola se pone brillante o húmeda, entonces se compone principalmente de arena o limo. La reacción de las arcillas ante esta prueba es poca o nula y simplemente se descomponen.

- **Prueba de rigidez** – Tome la mitad de la bola y amásela entre el pulgar y el dedo índice para secarla. Después, estírela rodándola con la mano a manera de formar una hebra o “gusano”. Si el gusano no se puede formar, entonces el suelo definitivamente es limoso o de arena fina. A los suelos altamente plásticos les toma mucho tiempo secarse. Se tornan duros y cerosos y se requiere de bastante presión para formar un gusano el cual se rompe al llegar a un diámetro de 3 mm (1/8 in.).

**PRUEBA DE RIGIDEZ**



- **Resistencia en estado seco** – Tome la otra mitad, amásela para formar una bola y déjela secar al aire. Una vez seca, aplástela y seleccione un fragmento dentado o puntiagudo. Trate de aplastar el fragmento entre el pulgar y el índice. El limo se hace polvo con mucha facilidad. La arcilla es dura como piedra y será casi imposible de aplastar con los dedos.

- **Lavado de manos** – Después de manipular limos y arenas, los dedos se sentirán polvorientos y quedarán casi limpios si los frota. Lávese las manos bajo un chorro de agua para eliminar todo residuo. Las arcillas al secarse forman una costra en los dedos que no se puede retirar si los frota. El agua en sí no la enjugará y es por ello que deberá frotarse las manos bajo un chorro de agua para limpiarlas.

**PRUEBA CON LA MANO**



- **Prueba con la mano** – Tome un puñado de suelo; apriételo y luego abra su mano. Si el suelo es granuloso y no retiene la forma que hizo con su mano, está demasiado seco. Si se desmenuza al dejarlo caer, está demasiado seco. Si es moldeable y se rompe solamente en algunos pedazos al dejarlo caer, tiene la cantidad correcta de humedad para una compactación adecuada. Si el suelo se siente plástico en su mano, deja rastros de humedad en sus dedos y se queda en una sola pieza al dejarlo caer, tiene demasiada humedad.

## TIPOS

- **Prueba de dispersión** – Además de las pruebas de campo descritas anteriormente, también está la prueba de dispersión que se utiliza para determinar el porcentaje de los tamaños de los granos e indicar qué tan difícil será compactar el suelo. Todo lo que se necesita es un vaso transparente, agua y una muestra representativa del suelo.

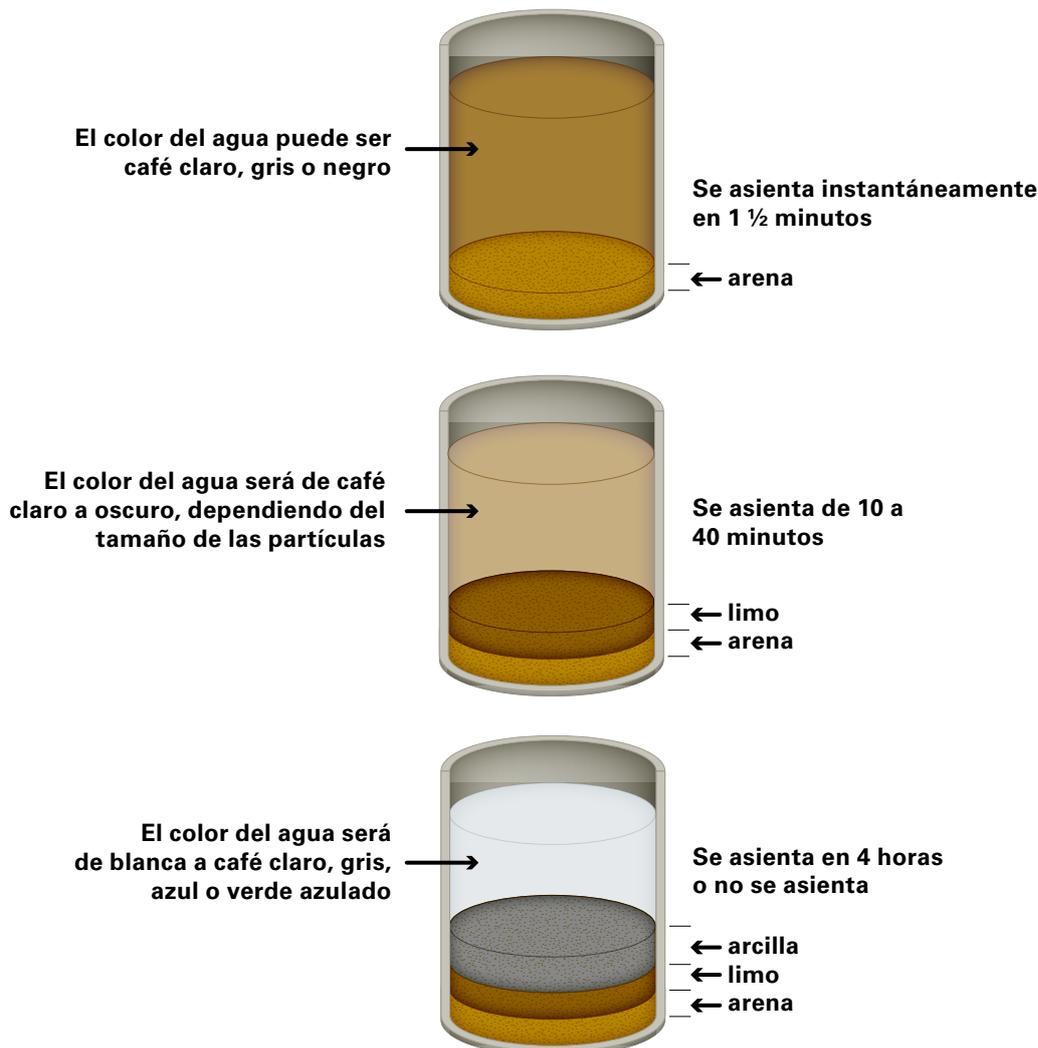
Llene el vaso de  $\frac{1}{4}$  a  $\frac{1}{3}$  de material. Vierta agua hasta quedar dentro de 15 mm ( $\frac{1}{2}$  in.) de la boca del vaso. Mezcle bien y observe cómo se asienta el material.

El material se asentará en tres diferentes capas; la arena en el fondo, seguido por el limo y finalmente la arcilla. Además de mostrar diferentes grupos, los resultados mostrarán si el suelo está bien o mal graduado. Aunque las partículas de limo y arcilla son tan pequeñas para verlas a simple vista, se podrán observar

los cambios en graduación por las diferencias en color. Asimismo, mientras más le tome a una capa en asentarse, menor serán las partículas.

Existen diferentes aspectos que se pueden aprender de la prueba de dispersión. Ésta mostrará los materiales básicos y graduaciones respectivas, y el tiempo de asentamiento indicará la finura de las partículas. En la mayoría de los casos, un solo tamaño de partícula (mala graduación) y un tamaño pequeño de partícula indicarán que el material de construcción es menos inestable que una mezcla donde hay buena graduación de todos los tamaños de partículas. Estos materiales son difíciles de compactar puesto que los granos continúan desplazándose bajo la máquina.

### PRUEBA DE DISPERSIÓN



[ **RESUMEN DE PRUEBAS DE CAMPO** ]

Tipos de suelo	Descripción
<b>Arcillas</b>	No reaccionan a la prueba de agitación; gusano áspero de secado lento; residuo seco, costroso y difícil de eliminar de las manos.
<b>Limos</b>	Reaccionan rápidamente a la prueba de agitación; gusano débil o desmenuzable; residuo polvoriento fácil de limpiar o lavar.
<b>Mezcla de limo y arcilla</b>	Reacción intermedia o conflictiva ante la prueba con la mano.
<b>Arena o grava con arcillas finas</b>	Suficiente arcilla para manchar la mano si se amasa una muestra húmeda, pero no lo suficiente para permitir que se forme un terrón.
<b>Arena o grava con limos finos</b>	Cualquier mezcla con partículas finas polvosas o bastante arenosas.
<b>Arenas y gravas limpias</b>	El agua agregada a estos suelos se hunde inmediatamente sin formar lodo.
<b>Roca fragmentada o fracturada</b>	Material dentado carente de suficiente material pequeño para llenar los vacíos.





## Unidad 3

# FÍSICA DE COMPACTACIÓN

El entender la física de compactar diferentes tipos de suelo y el efecto de las diferentes máquinas y sus capacidades de compactación es la clave para lograr la densidad del suelo de una manera rentable.



## [ FACTORES QUE INFLUYEN EN LA COMPACTACIÓN VIBRATORIA ]

La compactación vibratoria del suelo es un proceso complejo. Muchos factores diferentes influyen en el trabajo total de compactación. Todos estos factores que influyen deben de ser considerados en su totalidad, no en forma independiente. Son las características combinadas del compactador y del suelo que se compacta las que determinan el grado de esfuerzo de compactación. Y, las especificaciones del proyecto determinan si el esfuerzo de compactación es adecuado.

Los factores o características que influyen en la compactación vibratoria pueden ser divididos en tres categorías:

1. Características relacionadas con el material y la obra
2. Características relacionadas con las especificaciones del proyecto
3. Características relacionadas con la máquina

### Características relacionadas con el material y la obra

- **Tipo de suelo** – Un tipo de suelo dado tendrá características de compactación únicas; los suelos que son más difíciles de compactar necesitan compactadores más pesados.
- **Graduación** – La graduación de un material es el rango de tamaños de partículas presentes. Idealmente, hay cantidades relativamente iguales de todos los tamaños de granos sin que exista un tamaño predominante.
- **Uniformidad** – Un material de suelo es una mezcla de muchos tipos de suelo y tamaños de partículas. Se puede pensar que la uniformidad es el grado en el que muchos de los materiales compuestos están bien mezclados y dispersados uniformemente a través del suelo. Una mezcla de suelo uniforme es homogénea y compactará consistentemente; un suelo que no es uniforme mostrará compactación inconsistente.

El Coeficiente de Uniformidad ( $C_u$ ) en la mecánica de suelos es un parámetro que describe la distribución de tamaños de partículas (curva de graduación) de un suelo. Proporciona información sobre cómo están distribuidos los tamaños de granos uniformemente. En DIN EN ISO 14688-2:2004,  $C_u$  es definido como la proporción del diámetro  $d_{60}$  durante el cribado de 60 por ciento del diámetro  $d_{10}$  a una pasada de 10 por ciento. La proporción representa la pendiente del rango de la curva del tamaño del grano entre 10 por ciento y 60 por ciento de las pasadas (a través de la criba).

### CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

El valor  $C_u$  permite las siguientes afirmaciones sobre el suelo:

$C_u < 5$  = suelo uniforme

$C_u$  5-15 = suelo no uniforme

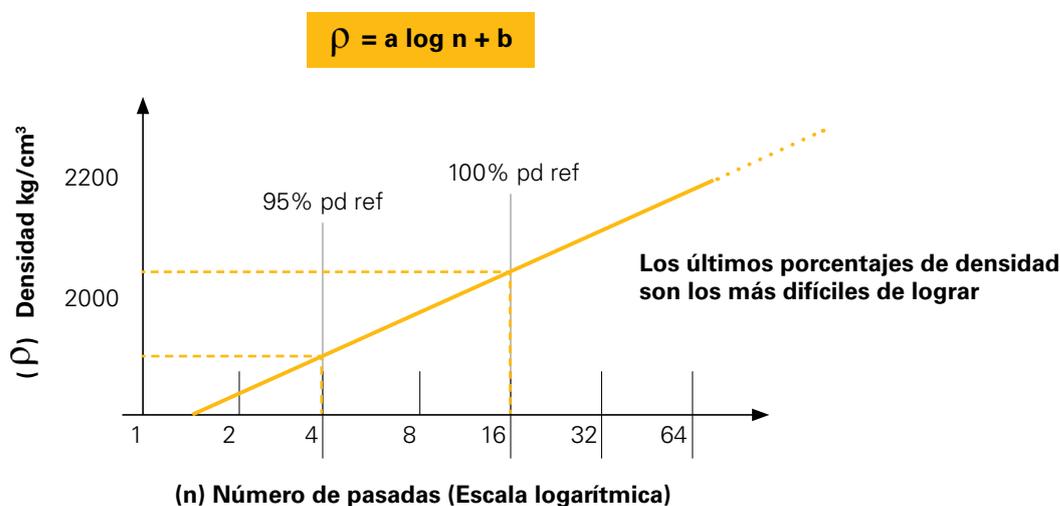
$C_u > 15$  = extremadamente no uniforme



- **Textura** – Los tipos de suelo individuales poseen diferentes texturas de superficie, que tienen un efecto en las características de compactación del material. Los tipos de suelo con textura gruesa crean mucha fricción entre las partículas por lo que requieren más energía del compactador para tener una adhesión más suelta. Esto les permite reposicionar en un estado más denso, por lo tanto permitiéndoles reposicionar en un estado más denso. Las partículas de textura más lisa se pueden deslizar más fácilmente una sobre la otra, lo que requiere menos esfuerzo para compactar.
- **Forma del grano** – Igual que la textura, la forma de las partículas también pueden afectar la compactación del suelo. Las formas irregulares tienden a tener mayor cohesión por fricción que requiere mayor esfuerzo de compactación. Las formas lisas y redondas se deslizan más fácilmente con menos esfuerzo de compactación.
- **Densidad inicial** – Los materiales con una densidad inicial más alta requerirán menos energía de compactación que los que tienen menor densidad. Esto afectará la productividad, ya que el material menos denso tal vez requiera de menos pasadas.
- **Contenido de humedad** – La humedad es el factor más importante que se debe considerar al compactar el suelo. La poca cantidad de humedad y partículas no se adherirán entre sí. Demasiada humedad hace que las partículas se desplacen fácilmente. Todo tipo de suelo tiene un contenido de humedad que es ideal para una compactación óptima (definido por la Prueba Proctor).
- **Características de la resistencia de agregados** – Todo tipo de suelo tiene una resistencia a la compresión basada en cómo se formó el agregado.
- **Base del subsuelo y su capacidad de soporte** – Una estructura es sólo tan fuerte y tan elástica como los cimientos que la sostienen. Si al subsuelo le falta capacidad para sostener una calle o carretera, lo más seguro es que la compactación de la sub-base y las capas de la base será difícil. Los suelos poco apropiados sólo pueden ser mejorados por una estabilización química o mecánica.

## EL COSTO DE LA DENSIDAD

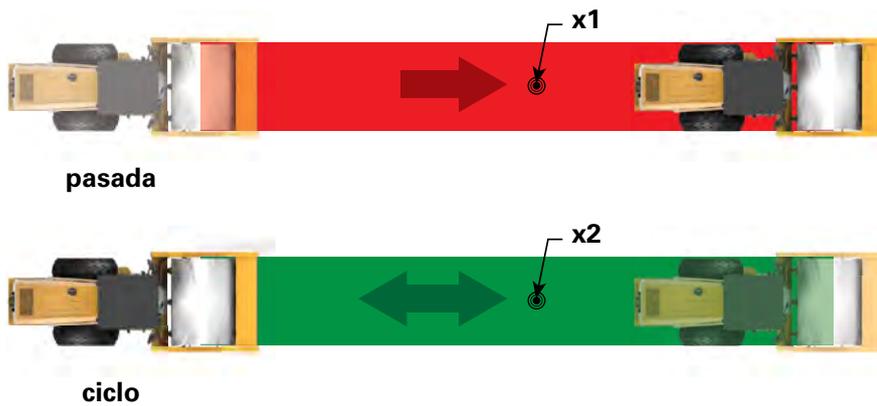
Incrementando el número de pasadas, aumenta la densidad



### Características relacionadas con las especificaciones del proyecto

- **Objetivo de compactación** – Normalmente, esto lo establece el administrador de la Prueba Proctor Estándar o de la Prueba Proctor Modificada y se especifica como cierto porcentaje de la máxima densidad de peso seco que resulte de esa prueba —en el ejemplo, el 95 por ciento de la prueba Proctor Estándar. Generalmente, entre más alta la meta de compactación, mayor será el número de pasadas que se requieran. Siempre es lo más difícil de lograr, los puntos de porcentaje finales de la compactación.
- **Grosor de la capa (lift)** – Al usar un compactador de tamaño dado, el grosor de la capa va a influenciar la productividad. Una capa más gruesa necesita más pasadas que una delgada.

## CONTANDO PASADAS



- **Número de pasadas** – Esto se refiere al número de veces que un compactador pasará sobre una superficie de tierra. Caterpillar define una pasada como un viaje sencillo sobre un área en dirección hacia adelante o de reversa, y al ciclo como dos pasadas consecutivas sobre un área; normalmente una en dirección hacia adelante y la otra en reversa.

El saber la cuenta de pasadas puede ser importante, sobre todo cuando se identifica que un área no cumple con las especificaciones de compactación. Si una obra recibe la misma

cobertura (número de pasadas) y un área falla y el resto pasa, podría ayudar a reducir el número de causas.

En casos donde se usan las especificaciones del método, se especificará el número de pasadas (con un compactador de tamaño adecuado en una capa de composición o grosor especificado). En esos casos, los ingenieros han determinado, por experiencia previa, que este número de pasadas será suficiente para lograr la meta de compactación.

### Características relacionadas con la máquina

El diseño de la máquina es importante para la dinámica de la compactación. Factores influenciadores incluyen: Tamaño del chasis, peso total, la trocha del equipo, relación del peso sobre el sistema de vibración versus el peso sobre las llantas y el balance del peso del equipo de izquierda a derecha. La lista continúa con factores tales como diámetro del tambor, ancho del tambor, masa del tambor, amortiguadores, masa del peso excéntrico y la distancia entre el eje de gravedad del peso excéntrico y el eje del tambor. Incluso el peso de combustible y del operador influyen en el rendimiento del compactador. El fabricante considera cuidadosamente todos esos factores cuando diseñan cada máquina.

La compactación vibratoria involucra un tambor (peso estático) que se mueve hacia arriba y abajo (amplitud) rápidamente (frecuencia) y movimiento



hacia adelante (velocidad de trabajo) sobre material no homogéneo. Por supuesto que la frecuencia, la amplitud y la velocidad de trabajo son variables controladas por el operador. Se verán más tarde en esta Unidad 3.

Todas estas variables significan que no es siempre fácil ajustar un compactador en una obra dada para lograr los resultados ideales de compactación. El objetivo en la compactación vibratoria es el encontrar un punto de fuerza máxima transmitida al material que se va a compactar. Esto ocurre cuando

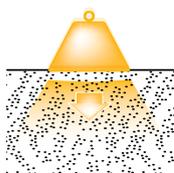
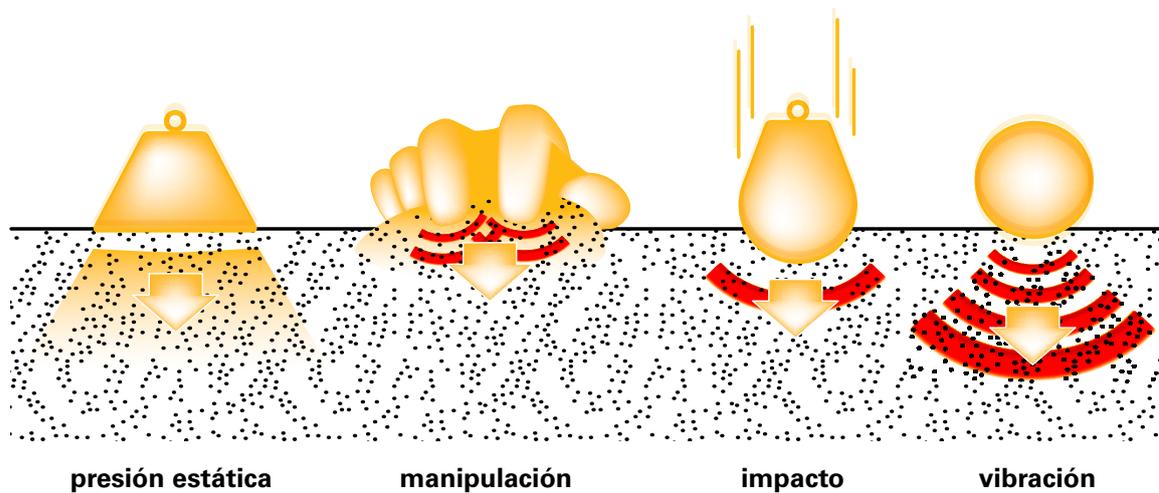
la suma de todos los factores — características de los materiales, amplitud, frecuencia y velocidad — contribuyen en forma óptima al esfuerzo de compactación que se requiere para cumplir con las especificaciones del proyecto.

[ **FACTORES QUE INFLUYEN EN LA COMPACTACIÓN VIBRATORIA** ]

Compactación es el proceso de comprimir un material de un cierto volumen a un volumen menor. Esto se logra al ejercer fuerza y movimiento sobre el área de contacto, causando que las partículas dentro del material rompan los vínculos naturales entre sí y se muevan más cerca unos de otros. Los vacíos entre las partículas—aire, agua o una combinación de ambos—son expulsados por la

combinación de fuerza y movimiento. Se usan cuatro fuerzas en la compactación:

1. **Presión estática**
2. **Manipulación**
3. **Impacto**
4. **Vibración.**



**Presión estática** – En compactación estática, la presión del peso del compactador produce esfuerzos cortantes en el suelo que causan que las partículas individuales se deslicen unas sobre otras.

La compactación ocurre cuando la fuerza aplicada causa que las partículas individuales rompan sus vínculos naturales entre sí y se reorienten en una posición más estable. Esta fuerza de compactación tiene un mayor efecto en los materiales superficiales y de poca profundidad. Tiene un efecto mínimo en suelos más profundos.

La carga lineal estática es usada por la industria para comparar el potencial de compactación de los compactadores estáticos de tambor liso. Es la fuerza vertical directamente debajo del ancho del tambor que crea el esfuerzo cortante para la compactación. Se calcula al dividir el peso del tambor (carga axial) entre el ancho del tambor. La carga lineal estática es expresada en kilogramos por centímetro lineal (kg/cm) o libras por pulgada lineal (lb/pulg). Los compactadores con una carga lineal más alta tienen un potencial de compactación y profundidad de influencia más altos.

## CARGA LINEAL ESTÁTICA

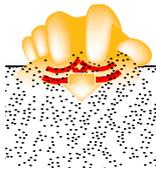


Carga lineal estática	
<b>Compactadores vibratorios de Suelos</b>	
5 - 8 Ton	16 - 22 kg/cm (90 - 120 lb/pulg)
8 - 12 Ton	20 - 30 kg/cm (100 - 200 lb/pulg)
12 - 15 Ton	30 - 45 kg/cm (180 - 250 lb/pulg)
>15 Ton	45 kg/cm+ (250 lb/pulg+)
<b>Compactadores de neumáticos</b>	<b>1000 - 3200 kg/rueda (2200 - 7000 lb/rueda)</b>

Para los compactadores estáticos de tambor de pisón truncado, de pisón de cuña y de pata de cabra la cantidad de presión de la punta ejercida constantemente varía al cambiar el número y superficie de las puntas que están en contacto con la tierra. La profundidad de penetración también puede afectar el cálculo. La presión de las caras de las puntas se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado (libras por pulgada cuadrada).

Se usa la compactación estática en aplicaciones donde se requiere un ligero toque, debido a los edificios cercanos, materiales que son frágiles o donde las superficies tienen una baja resistencia a la carga. También se usa en casos en donde demasiada fuerza de compactación podría extraer agua a la superficie.





**Manipulación** – La manipulación es una fuerza de compactación que reordena las partículas en una masa más densa por medio de un proceso de amasado. El proceso es especialmente efectivo en la superficie de la capa del material. La acción longitudinal y transversal de amasado es esencial cuando se compacta suelos muy estratificados, tales como suelos de arcilla. Los compactadores de pata de cabra y de neumáticos de ruedas escalonadas están específicamente diseñados para proporcionar este tipo de fuerza de compactación.



La fuerza de manipulación generada por los compactadores de neumáticos es producto de dos factores: la presión de contacto y la carga por rueda. El ajustar cualquier de los factores cambiará el desempeño del compactador.

La compactación por manipulación es útil para construir una superficie bien sellada para ayudar a que el material resista los efectos del agua y el clima.

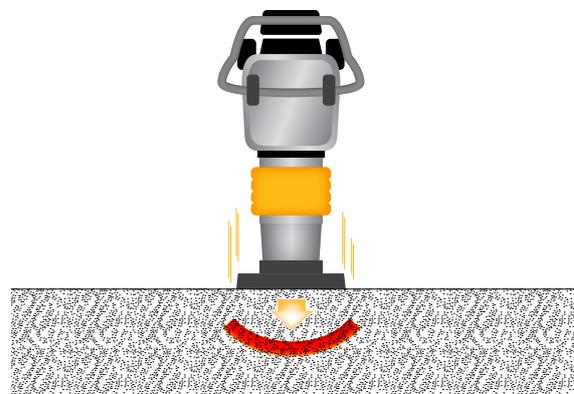
### FÓRMULA DE PRESIÓN DE CONTACTO

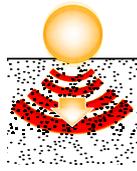
$$\text{PRESIÓN DE CONTACTO} \quad \frac{\text{kg/cm}^2 : \text{bar}}{\text{kg/cm}^2 : \text{bar}} = \frac{\text{Carga por rueda (kg)}}{\text{Área de contacto de rueda (cm}^2\text{)}}$$

$$\text{CARGA POR RUEDA} \quad \text{kg} = \frac{\text{Peso de operación del compactador}}{\text{Número de ruedas}}$$



**Impacto** – El impacto crea una fuerza de compactación mayor a la fuerza gravitacional de una carga estática. Esto es porque una masa en movimiento tiene velocidad, la cual es convertida en energía en el momento del impacto. El impacto crea una onda de presión que entra al suelo desde la superficie. Generalmente, los impactos son una serie de golpes. Los golpes de impacto de 50-600 golpes por minuto son considerados rangos de baja frecuencia y se usan en martillos de impacto y pisones manuales. Los golpes de impacto de 1,400-3,000 golpes por minuto son de alta frecuencia y se usan en compactadores vibratorios.





**Vibración** – La vibración es tal vez la fuerza de compactación más compleja y más rentable. Más del 90 por ciento de los compactadores vendidos en el mercado actual son vibratorios. Esto es debido a que los compactadores vibratorios pueden producir a la misma velocidad que un compactador estático que tiene como tres veces más masa. La energía vibratoria hace que un compactador vibratorio sea más eficiente que un compactador estático de tamaño similar.

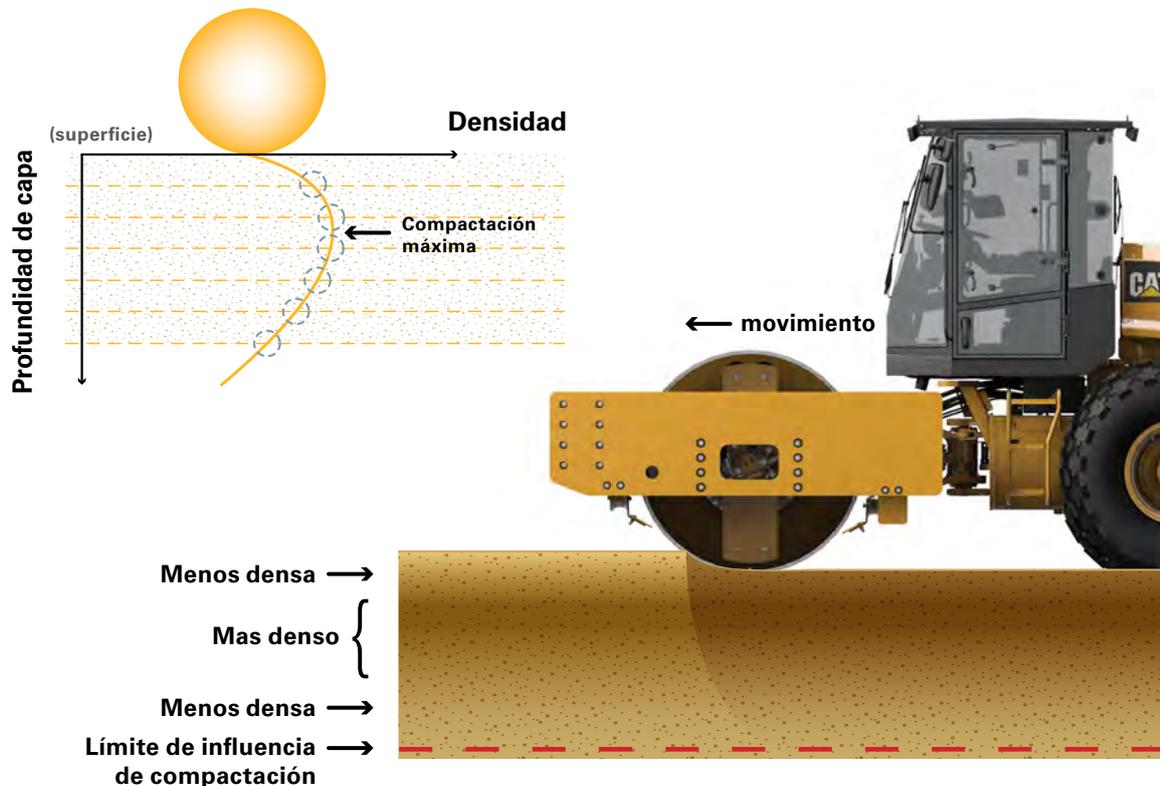
Los compactadores vibratorios producen una sucesión rápida de ondas de presión que se esparcen en todas direcciones. Las ondas de presión vibratoria reducen la resistencia al corte entre las partículas del material que se está compactando. Cuando se aplica presión, las partículas tienden a reorientarse en un estado más denso (menos vacíos). Para entender cómo funcionan los compactadores vibratorios, es necesario entender la dinámica de compactación vibratoria: amplitud y frecuencia, así como una

carga lineal estática y la proporción de masa vibratoria a masa suspendida.

Al trabajar el compactador, el volumen de suelo compactado no será compactado en forma uniforme de arriba hacia abajo. Un compactador de cierta masa compactará el suelo hasta cierta profundidad, pero el grado de compactación del suelo variará de la superficie a la máxima profundidad de influencia de la compactación. Por lo general, la superficie estará menos compactada, los suelos medianos tendrán la máxima compactación y los suelos más profundos estarán de nuevo menos compactados.

El cambiar los parámetros de operación puede influir en la profundidad de las zonas de compactación y alterar la profundidad de la zona de máxima compactación. Este fenómeno es llamado “gradiente de compactación” y estos datos ayudan a describir la capacidad de compactadores de cierto tamaño o su configuración de operación, para aplicaciones específicas de compactación.

## GRADIENTE DE COMPACTACIÓN



*Parece lógico que al usar un compactador de rodillo, el suelo de la superficie sea el más denso, sin embargo, la densidad máxima realmente ocurre debajo de la superficie y decrece cuando la profundidad reduce la influencia del compactador. A esto se le llama Gradiente de Compactación.*

[ **DINÁMICA DE COMPACTACIÓN VIBRATORIA** ]

**Amplitud** – La amplitud es la medida de distancia de movimiento vertical desde la posición de reposo hasta la posición más alta de un tambor vibratorio. Los fabricantes promueven este valor nominal, el cual se mide en un tambor suspendido. La amplitud real de trabajo, sin embargo, es el producto de la amplitud nominal y el coeficiente de amplificación, que es la proporción de la frecuencia transmitida con la frecuencia de resonancia de la máquina y la tierra que se compacta. Sería mejor pensar que la amplitud es la distancia que viaja el tambor hacia adentro de la tierra al desplazarse y compactar el suelo.

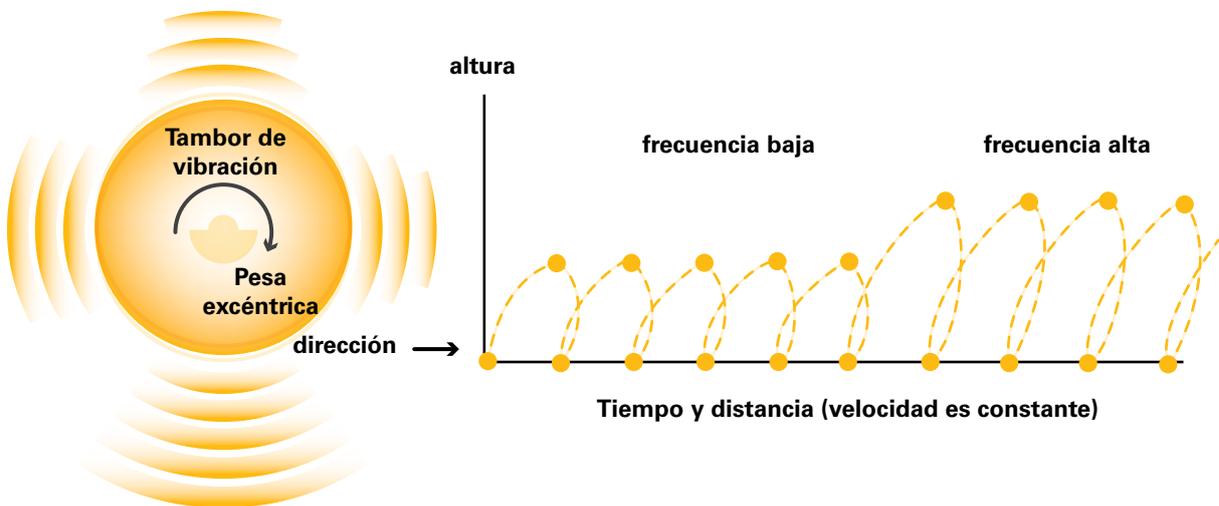
Al modificar la amplitud, un operador puede variar la fuerza y el movimiento (aceleración) del tambor en el material.

Cuando el suelo va alcanzando su máxima densidad, llega a un punto donde el suelo no puede absorber la energía de compactación que proporciona el compactador vibratorio.

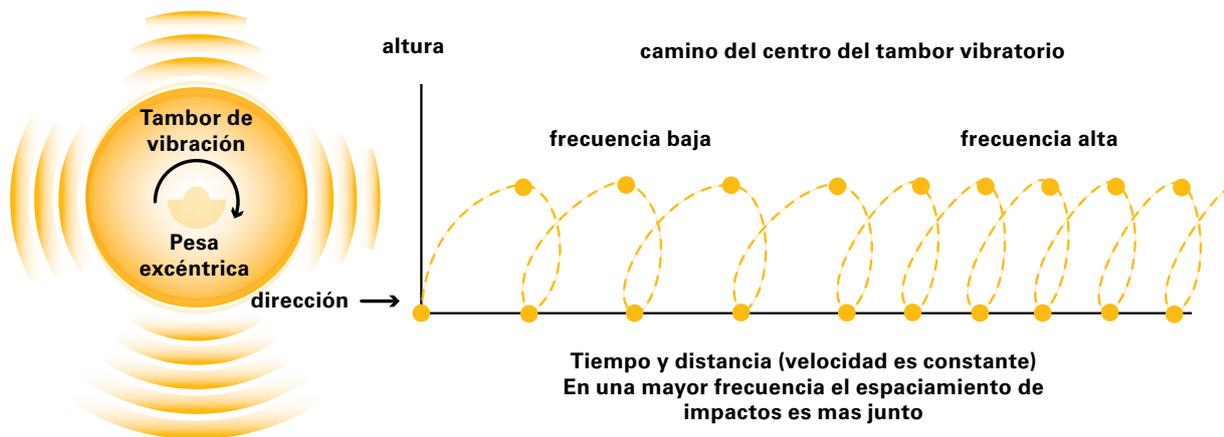
En este punto, el tambor puede rebotar desde la superficie y puede ocurrir un ciclo vibratorio mientras que el tambor está suspendido en el aire. Este fenómeno es llamado “desacoplamiento” o “doble impacto” y va acompañado de una particular y no característica vibración vigorosa que afecta a toda la máquina. El desacoplamiento puede dañar a la máquina y producir resultados indeseables en el suelo que se está compactando, tal como la descompactación.

Para detener el desacoplamiento, el operador necesita reducir la cantidad de energía que proporciona la máquina al suelo simplemente reduciendo la amplitud, lo cual reducirá la cantidad de fuerza de compactación aplicada al suelo. En forma alternativa, el operador podría trabajar en modo estático..

**AMPLITUD**



## FRECUENCIA



**Frecuencia y velocidad** – La frecuencia es una medida del número de ciclos o revoluciones completas de los pesos excéntricos alrededor del eje de rotación durante cierto tiempo. Normalmente, la frecuencia se expresa en unidades de hertz (Hz) o vibraciones por minuto (vpm). Típicamente, las frecuencias entre 23-35 Hz (1380-2100 vpm) se usan dependiendo del material y la configuración de amplitud.

La relación entre frecuencia y velocidad de trabajo algunas veces se simplifica a una regla general que indica que la frecuencia y la velocidad de trabajo deben ajustarse para que produzcan

aproximadamente un impacto por cada 25-30 mm (1-1.2 pulg). Una velocidad de trabajo que es demasiado rápida puede causar “ondulaciones” (washboarding) (impactos demasiado espaciados) y una velocidad de trabajo que es demasiado lenta impacta negativamente la productividad de la máquina. Existe una velocidad y frecuencia óptimas para cada aplicación de compactación, pero tal vez no produzcan un impacto por 25 mm (1 pulg). Es muy importante mantener una compactación uniforme y el utilizar características de control de velocidad automático para asegurar el equilibrio de velocidad y frecuencia puede ayudar a proporcionar esa consistencia.

**Relación de masa vibratoria sobre masa suspendida** – Uno podría suponer que si un compactador vibratorio de una cierta masa y amplitud puede compactar un cierto suelo con un cierto grado de eficiencia, entonces el simplemente aplicar más masa y más amplitud haría que el compactador fuera más eficiente en el mismo suelo. Esto no es necesariamente cierto.

En un compactador vibratorio, la masa vibratoria (tambor) está aislada de la masa suspendida (la estructura posterior), y la relación entre las dos es un factor crítico para determinar la masa y la amplitud que el compactador puede tener. Se equilibra la relación con cuidado para permitir que la máquina optimice la cantidad de energía que puede impartir al suelo en forma segura.



**masa total de operación**



**masa suspendida (no-vibrante)**



**masa vibratoria**



Resonancia trabajando en contra el esfuerzo de compactación



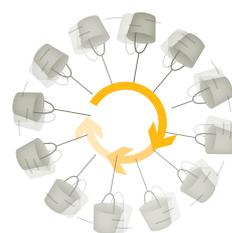
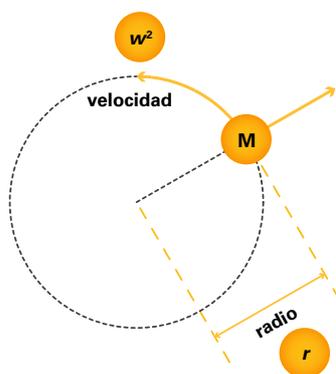
Resonancia trabajando en conjunto es convergencia armónica

**Resonancia** – Cuando la frecuencia de las vibraciones aplicadas a un objeto es igual a la frecuencia natural del objeto, el objeto va a vibrar en resonancia. En la compactación vibratoria, la resonancia es muy importante.

La interacción entre el material que se está compactando y la máquina vibratoria causa que vibre el material y la máquina. Las pesas excéntricas rotando dentro del tambor mantienen esta vibración a una frecuencia igual a las rpm del eje de las pesas. En algunas condiciones de la frecuencia dada, la máquina y el material entran en resonancia.

Las condiciones que producen resonancia dependen no sólo de las características de la máquina, sino también de la naturaleza del material que se va a compactar y de su grado alcanzado de compactación. La frecuencia ideal para lograr la transmisión eficiente de energía de compactación es aproximadamente 15 por ciento más alta que la frecuencia resonante.

## FUERZA CENTRÍFUGA



$$\text{Fuerza centrífuga} = Mw^2r$$

Para calcular la fuerza centrífuga, la masa ( $M$ ) de la pesa excéntrica se multiplica por el radio ( $r$ ) de rotación de la pesa excéntrica y por la velocidad de rotación (frecuencia) al cuadrado ( $w^2$ ). El factor más significativo en esta ecuación es la frecuencia.

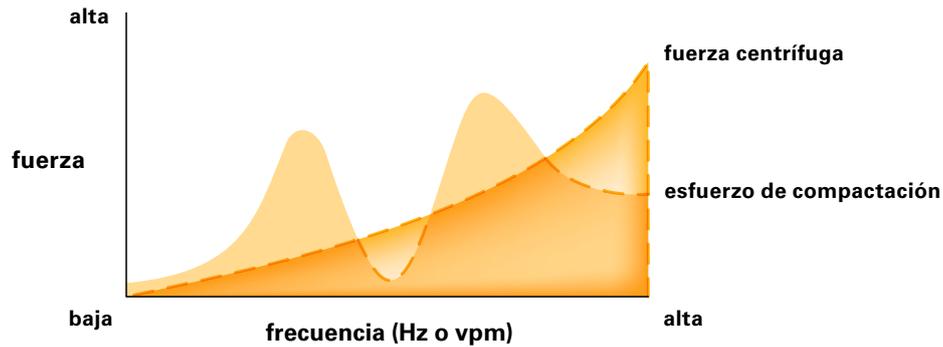
**Fuerza centrífuga** – Los compactadores vibratorios crean una fuerza centrífuga con una pesa o pesas excéntricas que giran dentro de un tambor. La fuerza centrífuga generada por el tambor es análoga al jalón que se siente al columpiar un balde lleno de agua. La masa de las pesas, su distancia de desplazamiento desde el centro de rotación al centro de gravedad y la velocidad de rotación contribuyen a la producción de esta fuerza. La fuerza centrífuga es un cálculo

teórico y frecuentemente se usa para calificar la productividad de compactadores vibratorios de suelo. Pero la fuerza centrífuga no es la forma precisa de juzgar una máquina. La fuerza vibratoria verdadera depende de una interacción completa entre el material que se compacta y la máquina.

## FUERZA Y FRECUENCIA

Esta gráfica muestra cómo la fuerza centrífuga teórica aumenta, al aumentar la frecuencia. Sin embargo, el esfuerzo de compactación que realmente se transmite al suelo varía al aumentar la frecuencia. El esfuerzo de compactación mostrará múltiples "picos" y valles.

Normalmente, existe un primer pico que representa un valor máximo del esfuerzo de compactación, que rápidamente cae y es seguido por un segundo pico. Generalmente, este Segundo pico producirá el valor más alto y representa cuando la productividad de la máquina está a su máximo.



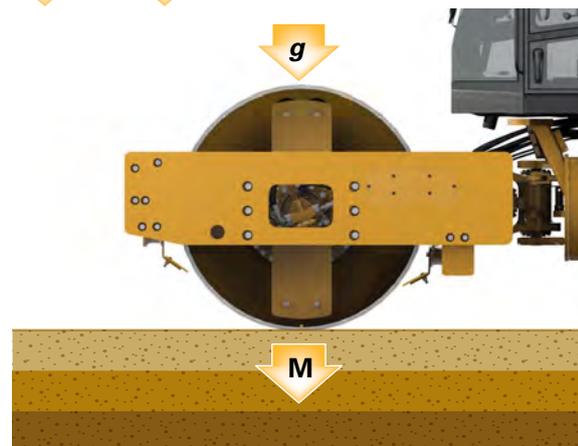
## FUERZA TOTAL APLICADA ( $F_{TA}$ )

$$F_{TA} = F_C + F_S$$

Donde:  $F_C$  es fuerza centrífuga =  $1100 \left( \frac{M}{1000} \right) \left( \frac{r}{1000} \right) \left( \frac{N}{1000} \right)^2$

y:  $F_S$  es carga aplicada a tambor estático =  $M \times g$

- $M$  masa del peso excéntrico (kg)
- $r$  momento de excentricidad (m)
- $N$  rpm
- $M$  masa aplicada por el tambor estático (kg)
- $g$  aceleración de la gravedad  $\left( \frac{\text{metros}}{\text{segundos}^2} \right)$



**Fuerza total aplicada** – La fuerza total aplicada es considerada como la cantidad máxima de energía vibratoria que un compactador puede aplicar a la tierra. Se calcula al agregar la masa estática de la compactadora a la fuerza centrífuga. Y así como con

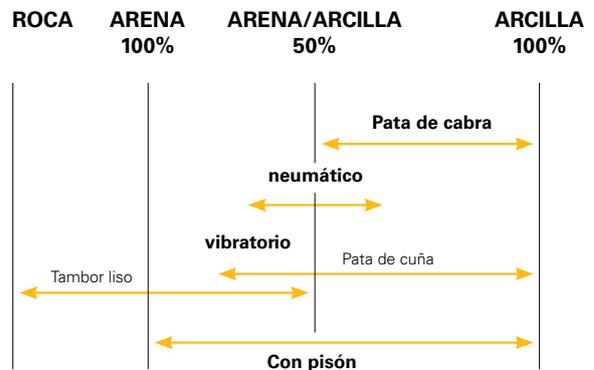
la fuerza centrífuga, se debe de tener cuidado al usar este cálculo para comparar las capacidades de compactación de los compactadores.

[ EQUIPO DE COMPACTACIÓN DE SUELO ]

Muchos factores influyen en la selección de equipo de compactación. El tipo de equipo seleccionado para un proyecto a veces está basado en la experiencia previa del contratista, el tipo de suelo, la especificación del método o el equipo disponible. Otra consideración es qué tan bien se ajustara a la tarea de acarreo y extendido. Las condiciones climáticas y de tracción también son importantes. Algunas veces, el interés del contratista en estandarizar la flota de equipos, juega un papel en el proceso de toma de decisiones.

La gráfica de aplicaciones proporciona directrices para equiparar el equipo con las variables de la obra y los tipos de suelo. No hay ningún compactador que haga todas las cosas en las aplicaciones. Cada tipo tiene un material y rango de operación definitivo con los cuales es más económico. En muchos casos, existen aplicaciones en donde las máquinas de diferentes tamaños y tipos pueden lograr la meta de compactación, pero al seleccionar la máquina que sea la más apropiada, hará el trabajo en forma más económica y eficiente por las pasadas reducidas, el uso reducido de combustible y menos tiempo de trabajo.

GRÁFICA DE APLICACIÓN



**Compactadores vibratorios** – Los compactadores vibratorios funcionan bajo el principio de reordenar las partículas para reducir los vacíos y aumentar la densidad y la resistencia para aguantar la carga. Vienen en dos tipos: tambor liso y tambor de pata de cabra. Para mayor versatilidad, los compactadores de tambor liso pueden estar equipados con juegos de cubiertas de pisones que permiten el uso de rodillos de tambor liso en aplicaciones de pata de cabra, aunque con desempeño limitado.

Los compactadores vibratorios de tambor liso generan tres fuerzas de compactación: presión

estática, impacto y vibración. Las máquinas de tambor de pata de cabra generan las mismas fuerzas, además de generar también fuerza de manipulación. Los compactadores vibratorios proporcionan una compactación uniforme a través de la capa.

Se logra la densidad debido a las fuerzas generadas por la vibración del tambor al impactar el suelo. Los resultados de compactación son una función de la frecuencia y amplitud de los golpes, así como la fuerza de los golpes y el período de tiempo sobre los cuales se aplican los golpes.





*Las puntas ovaladas son buenas para los suelos cohesivos y capas más gruesas.*

La relación frecuencia/tiempo es la causa por la que hay velocidades de trabajo más lentas en los compactadores vibratorios. La velocidad de trabajo es importante, porque dicta la duración en la cual una parte particular del relleno va a ser compactada. Para los compactadores vibratorios, una velocidad de 1-2,5 km/h (0.6- 1.6 mph) para roca y arcilla, y 2-5 km/h (1.2-3 mph) para grava y arena proporcionarán los mejores resultados.

Los compactadores vibratorios de tambor liso fueron las primeras máquinas vibratorias utilizadas. Son las más efectivas en materiales granulares con tamaños de partículas que van desde piedras grandes hasta arena fina. También se usan en suelos semi-cohesivos con hasta 50 por ciento de contenido de suelo cohesivo. Los grosores de capas varían de acuerdo con el tamaño del compactador. Cuando se usa una piedra grande en el relleno, las capas pueden ser muy gruesas—capas de hasta 1.2 m (4 pies) no son inusuales. Algo que hay que recordar cuando hay rocas grandes en el relleno es que el grosor debe de ser de alrededor de 300 mm (12 pulg) más que el tamaño máximo de roca. Esto permite la consolidación de capas sin que las rocas grandes sobresalgan de la superficie.

Las máquinas de tambor de pisonos expanden el rango del material para incluir suelos con más de 50 por ciento de material cohesivo y un mayor porcentaje de finos. Cuando la punta penetra la parte superior de la capa, rompe los enlaces naturales entre las partículas del suelo cohesivo y logra mejores resultados de compactación. Las puntas están

*Caterpillar también ofrece una opción de juego de cubierta de protección de pisonos para los compactadores de tambor liso. El forro de dos piezas se atornilla al tambor liso, permitiendo que el compactador se use en suelos cohesivos como un tambor normal de pisonos. Tanto el forro del juego de punta cuadrada, como el de punta ovalada están disponibles.*



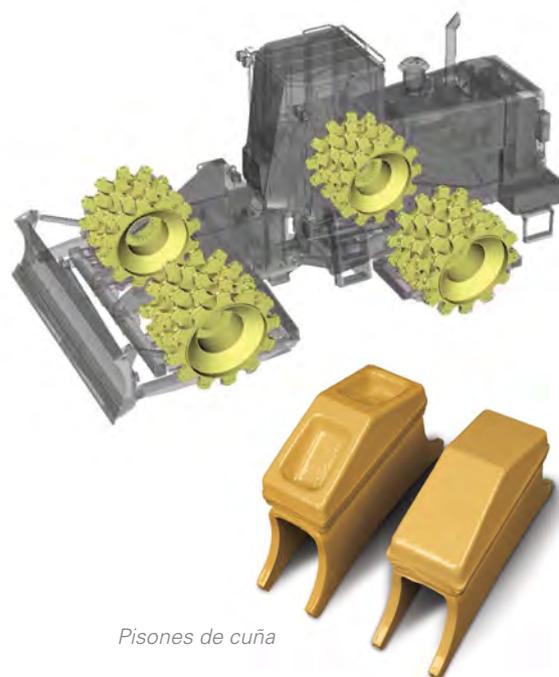
*Las puntas cuadradas son mejores para suelos semi-cohesivos y capas más delgadas.*

intrincadas para que salgan de la capa sin levantar el suelo y ahusadas para ayudarles a mantenerse limpias. El grosor típico de las capas para los tambores de pisonos en suelo cohesivo está en el rango de 150-460 mm (6-18 pulg).

Caterpillar tiene disponibles dos puntas: las de cara cuadrada y las de cara ovalada. Las puntas cuadradas funcionan bien en suelos semi-cohesivos y en capas más delgadas de menos de 150 mm (6 pulg). Las puntas cuadradas hacen un buen trabajo en el sellado de superficies.

Las puntas ovaladas tienen menos superficie que las puntas cuadradas, por consiguiente ellas aplican mayor presión sobre el suelo que las puntas cuadradas. Esto permite que la punta penetre en la capa. Las puntas ovaladas funcionan mejor en suelos cohesivos y capas más gruesas de 150-460 mm (6-18 pulg). Las puntas ovaladas no sellan la superficie tan bien como las puntas cuadradas.





Pisones de cuña

**Compactadores de pisón de cuña –**

Los compactadores de pisón de cuña son compactadores de alta velocidad, auto propulsados y no vibratorios. Generalmente tienen cuatro ruedas de acero con pisones y están equipados con una hoja topadora. Sus puntas son ahusadas con una cara rectangular.

Los compactadores de pisón de cuña compactan desde el fondo de la capa a la parte superior. Como las puntas son ahusadas pueden emerger de la capa sin levantar la tierra. Por lo tanto, la parte de arriba de la capa también se compacta y la superficie es relativamente lisa y sellada. Los compactadores de pisón de cuña son capaces de alcanzar velocidades en el rango de 16-32 km/h (10-20 mph), pero normalmente operan en el rango de 10-15 km/h (6-10 mph).

Generalmente, de 2 a 3 ciclos (4 -6 pasadas de máquina) lograrán las densidades deseadas en capas de 200-300 mm (8-12 pulg) aunque se podrían necesitar 4 ciclos en limo plástico de graduación pobre o arcilla muy fina.

**Compactadores de pata de cabra –**

Los compactadores pata de cabra derivan su nombre del hecho de que los antiguos constructores de caminos romanos pastoreaban borregos de un lado a otro sobre material base hasta que el camino quedara compactado. La palabra "pata de cabra se convirtió en un término genérico para describir todo tipo de tambores de pisones. En realidad, un compactador pata de cabra es muy diferente al tambor de pisones o a los compactadores de pisón de cuña.

Los compactadores de pisón de cuña son efectivos en todos los suelos, menos en la arena limpia.

Los compactadores de pisón de cuña dejan una superficie sellada bastante lisa, por lo que las unidades de acarreo pueden mantener una velocidad alta al viajar sobre el relleno. También, ya que los compactadores de pisón de cuña equipados con hoja topadora esparcen y compactan, el contratista puede reducir el número de tractores de extendido.

Los compactadores de pisón de cuña son los más adecuados para proyectos grandes. Necesitan pasadas largas y sin interrupción para lograr velocidad que genere una producción alta. En las capas mayores a 300 mm (12 pulg), los compactadores de pisón de cuña son cerca de 2 a 3 veces más productivos que los compactadores vibratorios de un solo tambor. La aplicación, el tamaño de la obra y el presupuesto detrás de la toma de decisiones establecerán cuál es el mejor tipo de máquina.

Un pisón de pata de cabra es cilíndrico, generalmente de 200 mm (8 pulg) de largo. El pisón es circular y tiene un rango de diámetro de 76-127 mm (3-5 pulg). Los pisones en el compactador de pisón de cuña o de tambores de pisón de cuña son ahusados de forma ovalada o rectangular. La cara del pisón es más pequeña que la base del pisón— esa es una diferencia importante.



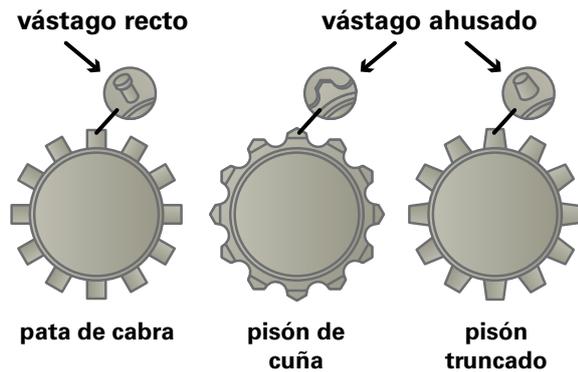
Los pisones en los tambores pata de cabra penetran a través de la capa superior y realmente compactan la capa debajo. Cuando un pisón emerge del suelo, avienta o levanta el material. El resultado es una capa de material suelto en la parte de arriba. Cuando se esparce más relleno, la capa superior es levantada y la capa anterior se compacta. Un compactador de pata de cabra realmente compacta de abajo hacia arriba.

El usar un compactador de pata de cabra tiene un beneficio seguro, Como la capa superior del suelo siempre se está levantando, el proceso ayuda a airear y secar las arcillas y limos húmedos.

Pero las desventajas de los compactadores de pata de cabra son numerosas. El material suelto de la capa superior puede actuar como esponja cuando llueve y demorar el proceso de compactación. El material suelto también hace que las unidades de transporte que depositan el material de relleno vayan más lentas, por lo que aumentan los tiempos de ciclos.

Además, los compactadores de pata de cabra pueden trabajar solamente a velocidades de 6-10 km/h (4-6 mph), lo que anula cualquier beneficio por el impacto y la vibración. La presión y manipulación son las únicas fuerzas de compactación que se ejercen en el suelo. Generalmente, se necesitan de 6 a 10 ciclos (12-20 pasadas de máquina) para alcanzar la densidad meta en capas de 200 mm (8 pulg). Los compactadores de pata de cabra ya no se usan mucho.

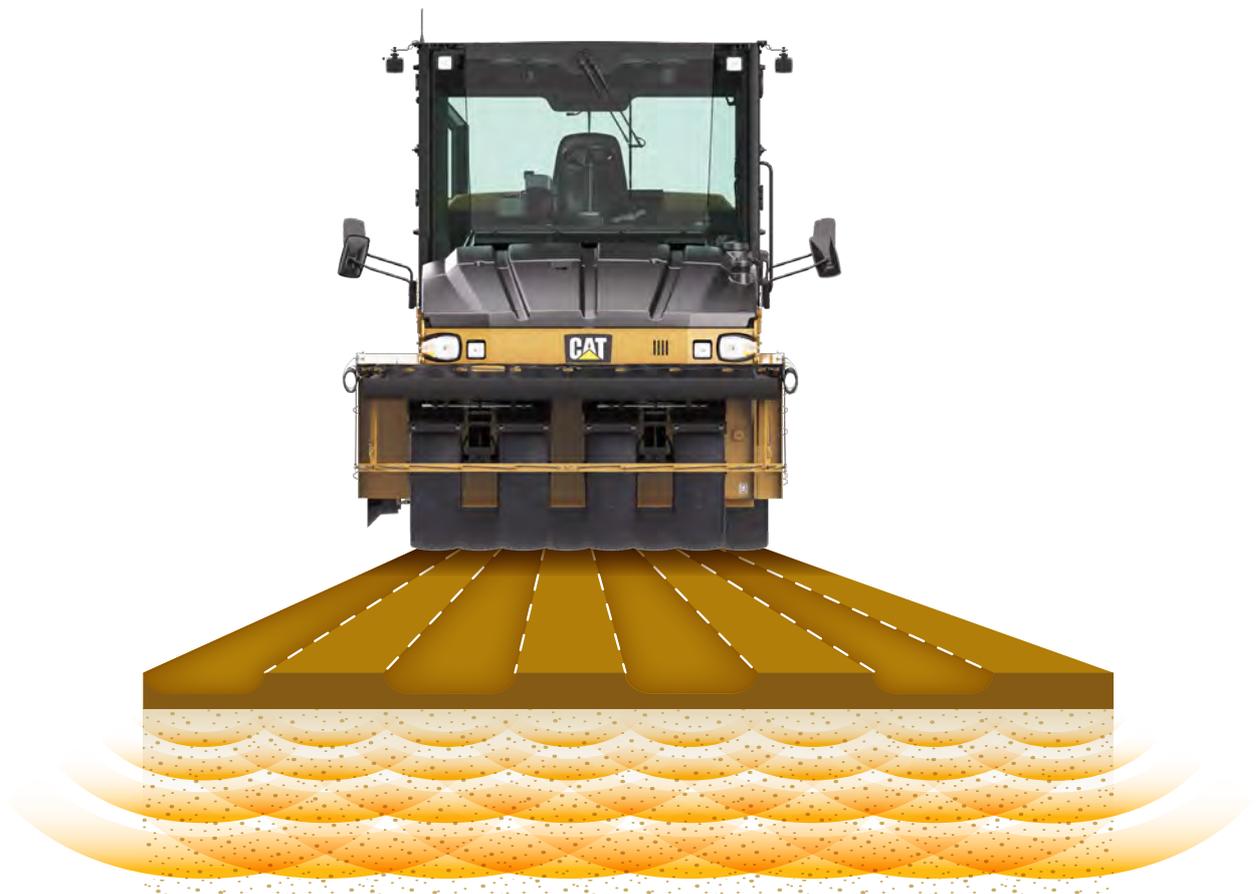
**CONFIGURACIONES DE PISONES**



**Compactadores neumáticos** – Los compactadores neumáticos se usan en tareas pequeñas a medianas de compactación, sobre todo en materiales de base granular y aplanado. Frecuentemente, se usan como compactador para terminado después de que un compactador de tambor vibratorio termine la compactación de la capa. Los compactadores neumáticos son más apropiados para sellar la superficie y aplicaciones especiales como la compactación de capas delgadas o requerimientos especiales establecidos por tipo de obra.

Las fuerzas de compactación (presión y manipulación) generadas por los neumáticos de caucho trabajan desde arriba de la capa hacia abajo para producir densidad. Esta cantidad de fuerza de compactación puede ser variada al alterar la presión del neumático (el método normal) o al cambiar el peso del lastre (menos frecuente). La acción de amasado causada por el patrón escalonado del neumático ayuda a sellar y alisar la superficie.

Se pueden usar los compactadores de neumáticos en tierra o asfalto, lo que es una ventaja que permite al contratista de caminos utilizar un compactador para múltiples etapas de construcción.



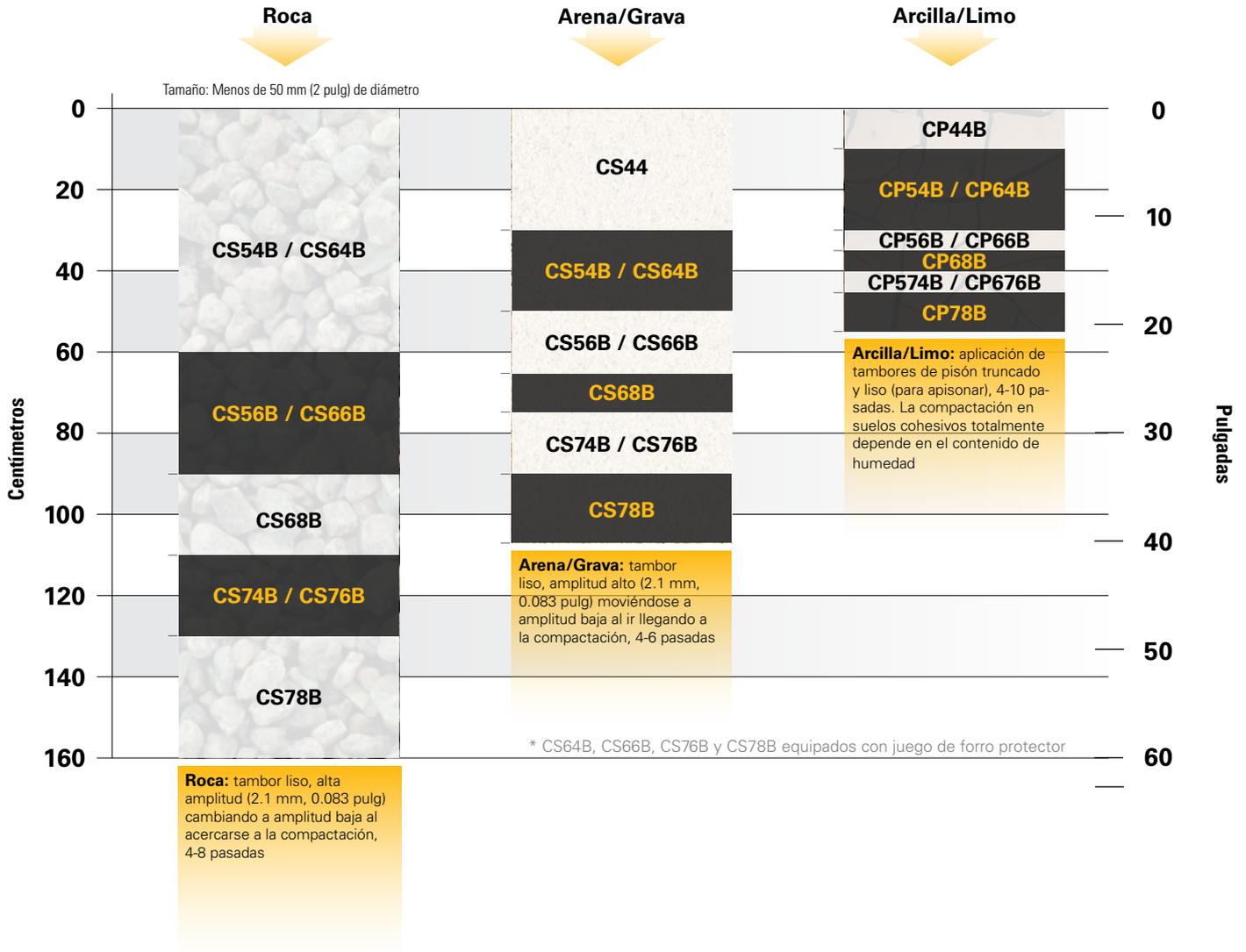


**Placas vibratorias posteriores** – En material no cohesivo, los compactadores vibratorios de suelo de un solo tambor pueden ser equipados con placas vibratorias posteriores, lo que proporciona un sellado de la superficie que no se puede lograr con solamente el compactador de un solo tambor. Esto permite al operador considerar el gradiente de compactación: el rodillo vibratorio de un solo tambor logra una compactación profunda y la placa vibratoria compacta y sella la superficie.

Cuando no se necesitan las placas vibratorias, las placas deben de ser removidas de la máquina porque su peso puede reducir la carga lineal del tambor, lo que puede significar que se requerirán pasadas adicionales para lograr la meta de compactación.

### PROFUNDIDAD DE COMPACTACIÓN

La especificación supuesta de densidad es 95% de Proctor Estándar y puede variar considerablemente debido a las diferentes condiciones del suelo.

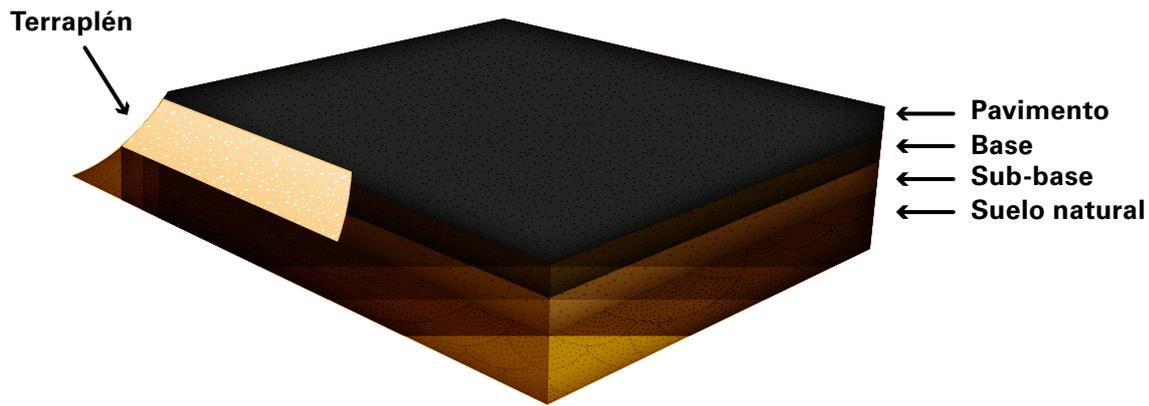






## Unidad 4 APLICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD

Los parámetros de un proyecto impactan la colocación de suelos y su compactación de manera significativa. El aprender a maximizar resultados ante una gran variedad de condiciones le permitirá maximizar eficiencias y evitar retrabajos. Los métodos de medición comprobados y nuevos también le permiten gestionar mejor sus proyectos de compactación.



### [ ELEMENTOS DE LA ESTRUCTURA DE LA OBRA ]

Así como en cualquier obra, una carretera tiene componentes específicos con funciones específicas. La terminología puede variar según la región, pero estos componentes trabajan juntos para apoyar la carga del tráfico que pasa sobre ella.

**Suelos naturales o nativos** – Referidos en ocasiones como “sustratos”, “subrasantes” o “suelos de base”. Este es el cimiento de la superficie de una carretera y se compone de suelo y materiales presentes de manera natural sin modificación por el hombre o químicos. En el proceso de construcción de una carretera, la parte superficial del suelo se desmonta para obtener una rasante plana y nivelada. Los materiales que quedan expuestos en el fondo del corte son los suelos naturales. En caso de que estos materiales no soporten la carga de la estructura de la carretera, se modifican o reemplazan por materiales adecuados. La modificación puede ser mecánica, como es la compactación, el refuerzo con geosintéticos o la incorporación de agregados; como también química a través de la incorporación de cementantes tales como cemento Portland; o una combinación de lo mecánico y lo químico. El objetivo es mejorar las capacidades de carga del material. En última instancia, este cimiento deberá proporcionar el soporte adecuado para la estructura.

**Terraplén** – Un terraplén es cualquier relleno cuya parte superior es más alta que la superficie adyacente. La superficie de la carretera está diseñada para que tenga cierto ancho y soporte la carretera conforme a la elevación y rasante construidas. En algunos casos, las ondulaciones presentes en el terreno de manera natural pueden requerir material de relleno para obtener una subrasante adecuada para la superficie de la carretera. Los terraplenes se construyen con este propósito mediante la colocación y compactación adecuada de agregados para rellenar el terreno hasta obtener la cota requerida.

**Sub-base** – La función principal de esta capa es la de distribuir en el sustrato la carga de la estructura a la cual soporta y proporcionar una rasante relativamente pareja donde colocar la carpeta base. No obstante, dependiendo de la composición de los materiales en el sustrato, la sub-base también puede tener funciones adicionales al servir como una capa filtrante o actuar como barrera contra la capilaridad del agua. Típicamente, esta capa se compone en gran parte de materiales de sustrato modificados y de ser necesario, compactados. Se pueden tener varias capas de sub-base para permitir el soporte de mayores cargas. Generalmente, los agregados utilizados en la sub-base pueden ser mayores que los agregados utilizados en las carpetas que la sub-base soporta.

**Base** – La función de la carpeta base es similar a la de la sub-base. Sirve para la distribución de la carga sobre ella y brindan protección contra los efectos del agua y congelamiento. Puede constar de una o varias capas, dependiendo de los requerimientos de la carga. La base se compone de una mezcla de grava diseñada con partículas más pequeñas que las utilizadas en la sub-base.

La carpeta de asfalto se coloca sobre este cimiento. La calidad del cimiento afectará la durabilidad de la(s) carpeta(s) que se le colocan encima. Para mayor información sobre las carpetas de asfalto, consulte la Guía para la Compactación de Asfalto de Caterpillar.

**[ PROCEDIMIENTO PARA LA COMPACTACIÓN DE SUELOS ]**

**TRAZADO DE LA OBRA**

Previo a establecerse el procedimiento de compactación, el contratista deberá considerar lo siguiente:

- ¿Cuál es la granulometría y clasificación del suelo?
- ¿Cuál es la densidad seca máxima y contenido de agua?
- ¿Cuál es el requerimiento de compactación (%)?
- ¿Cuáles son los ajustes y velocidad de la unidad compactadora?
- ¿Cuál es el grosor de la carpeta?

El contratista necesita conocer el material, los requerimientos y la aplicación de cada equipo. Cuando conozca estas variables, el contratista podrá deliberar la mejor estrategia para la obra y asimismo considerar las tecnologías disponibles a utilizar.

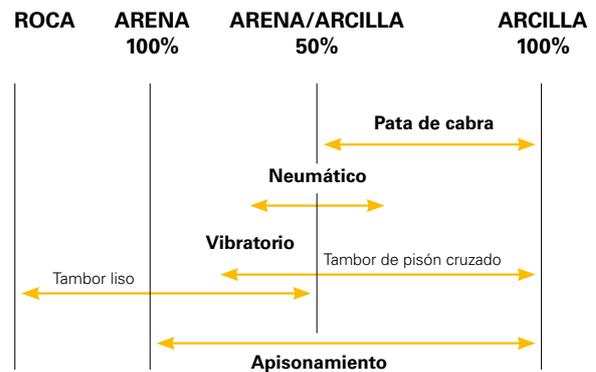
**Aplicación y tamaño de la unidad compactadora**

– Las características operacionales de los diferentes tipos de compactadores se muestran en la gráfica más adelante. Para efectos de comparación, la gráfica muestra los rangos de aplicación en donde cada compactador es más efectivo. Los compactadores pueden coincidir en estos rangos y no es raro ver máquinas trabajando con materiales fuera de su zona de aplicación normal. Por lo tanto, la información presentada en estas gráficas deberá considerarse estrictamente como directrices de aplicaciones aproximadas.

**Preparación de la obra y el terraplén –**

La preparación de la obra implica un amplio rango de actividades sobre el material tales como: preparación del cimiento, nivelación, relleno y encause de cuencas. Puede tratarse de una zona urbana, una ruta u otro tipo de superficies o estructuras.

**GRÁFICA DE APLICACIONES**



**CARACTERÍSTICAS OPERACIONALES DEL EQUIPO DE COMPACTACIÓN DE SUELOS**

*Solamente autopropulsados*

Máquina	Pata de cabra	Neumático (15 toneladas y más)	Pata de apisonamiento	Vibratorio
<b>Espesor de carpeta compactada - mm (in)</b>	150 - 300 (6 - 12)	150 - 300 (6 - 12)	150 - 300 (6 - 12)	150 - 600 (6 - 24)*
<b>Velocidad promedio en operación - km/hr (mph)</b>	6 - 10 (4 - 6)	6 - 19 (4 - 12)	16 - 32 (10 - 20)	2 - 8 (2 - 5)
<b>ciclos</b> (1 ciclo = 2 pasadas)	6 - 10	3 - 8	4 - 8	2 - 4

*\*Depende del tamaño de la unidad compactadora y objetivo de compactación*



### **Relleño de material**

**pétreo** – El uso de las rocas como relleno para terraplenes es cada vez mayor en la construcción de carreteras. También se utilizan en gran medida en la construcción de terraplenes de presas, aeropuertos, edificios y malecones. Las rocas fragmentadas usualmente contienen tantos finos que se asientan considerablemente si el relleno no se compacta.

El relleno de material pétreo usualmente se distribuye en capas de 450-1200 mm (18-48 in). La manera cómo se distribuye el mismo antes de la compactación es vital. La distribución en capas por medio de una topadora crea un relleno uniforme ya que su cuchilla acomoda las rocas y las orugas facilitan la compactación. De esta manera, una

superficie relativamente densa y pareja se puede preparar mediante el compactador.

Grandes fuerzas de compactación son requeridas una vez que las rocas han sido distribuidas a fin de reubicar las más grandes y lograr una densidad y estabilidad. Las unidades compactadoras más grandes con tambores vibratorios lisos son las seleccionadas para este tipo de trabajo. Los esfuerzos a los que se someten estas unidades son grandes. El tambor deberá estar fabricado con acero grueso de alto grado. De presentarse un efecto demoledor sobre el material superficial, el número de pasadas deberá reducirse. Si la unidad está equipada con ajuste de amplitud, se podrá utilizar la amplitud más baja para reducir la distorsión del material superficial.



### **Arena y grava –**

La compactación vibratoria de arena y grava mediante unidades de tambores lisos es la más adecuada y económica. Una buena selección del compactador en base al espesor de la carpeta permite alcanzar altas densidades en pocos pases.



Una composición de arena y grava para drenaje con menos del 10 por ciento de finos son fáciles de compactar, especialmente cuando están casi saturados. Cuando se requiere de una densidad alta y las capas son gruesas, se deberá agregar agua. El agua será drenada de la carpeta durante el proceso de compactación.

Si contienen más del 10 por ciento de finos, el suelo ya no tendrá drenado libre y podrá volverse elástico si el contenido de agua es alto. Este tipo de suelos tiene el contenido óptimo de humedad para lograr la densidad máxima. Pudiera ser necesario secar el suelo mojado para alcanzar el contenido óptimo de humedad.

En arenas y gravas pobremente graduadas es difícil alcanzar una densidad alta en las capas superficiales del material. Los suelos pobremente graduados tienen poca resistencia al corte y las capas superiores tienden a elevarse detrás del tambor. Esto no es un problema cuando se compactan varias capas. La capa previa se ha de compactar mientras se va compactando la siguiente capa. Sin embargo, se deberá tener presente la dificultad para compactar la superficie para efectos de la prueba de densidad.



*Cuando el contenido de humedad está por debajo del nivel óptimo, se podrá agregar agua para alcanzar una compactación adecuada.*



**Limo** – Los limos son finos no plásticos que usualmente son compactados con tambores lisos vibratorios. Se pueden extender y compactar en capas gruesas.

Así como todos los suelos de grano fino, su compactabilidad depende de la humedad. Para mejores resultados, el contenido de agua no deberá variar demasiado del contenido óptimo de

humedad. Si tienen demasiada agua, los limos rápidamente alcanzarán el estado líquido y la compactación será imposible. Esto significa que las capas tendrán que airearse con discos, ser mezclados con suelo seco (un procedimiento caro) o tomar material prestado para un mejor drenado. La cohesión de los suelos limosos que también tienen arcilla puede ser alta. En estos suelos, el tambor de pisón, de apisonamiento o compactadores neumáticos lograrán mejores resultados.



**Arcilla** – Las arcillas tienen propiedades plásticas. Esto significa que las características de compactación dependen en gran medida del contenido

de humedad. Cuando el contenido es bajo, la arcilla se vuelve dura y firme. Cuando el contenido está por encima del óptimo, la arcilla se vuelve cada vez más plástica y difícil de compactar.

La necesidad de ajustar el contenido de agua es el problema principal que frecuentemente se presenta en la compactación de arcilla. La adición de agua mediante camiones rociadores, discos o estabilizadores de suelo, consume mucho tiempo. La humectación dentro de una fosa temporal puede ser una mejor alternativa. El secado de arcilla mojada solamente se puede realizar en condiciones cálidas y secas por medio de discos y estabilizadores de suelo. La rodadura prolongada con compactadores de pata de cabra algunas veces se efectúa para reducir el contenido de humedad.

Aún cuando el contenido de humedad es óptimo, las arcillas requieren de un mayor esfuerzo de compactación así como trabajarse en capas más delgadas que en comparación con los materiales no cohesivos. Los compactadores de tambor de pisón funcionan mejor ya que al penetrar el suelo, rompen la adherencia cohesiva natural entre las partículas. Los compactadores neumáticos pueden utilizarse en arcillas con un Índice de Plasticidad de baja a media.



*Quando el contenido de humedad es muy alto, se abre el suelo para acelerar el tiempo de secado.*

En proyectos con requerimientos de alta producción y que utilizan la arcilla como relleno, se logran buenos resultados mediante la combinación de compactadores de apisonamiento y compactadores vibratorios de tambor de pisón. Los compactadores de apisonamiento equipados con cuchillas son eficientes para distribuir el relleno, rompiendo los duros y grandes terrones de arcilla que frecuentemente provienen de la arcilla previamente humectada en la fosa. Estas máquinas efectúan las primeras pasadas. La densidad final se logra utilizando compactadores vibratorios de tambor de pisón.

**Aplicaciones de Base y Sub-base** – Las bases y sub-bases son las capas que se construyen en la parte superior del terraplén o de una superficie natural. Estas capas funcionan como cimientos para estructuras tales como una carretera o una edificación. La resistencia se ve incrementada conforme se llega a la superficie terminada. Los materiales utilizados en estas capas

dependen del tipo de carga que la carretera o la edificación soportará.

Las especificaciones que usualmente se dan para los materiales de la base y sub-base, el espesor de las capas, la densidad requerida y los módulos de la deformación son muy estrictas.

**Suelos naturales (nativos)** – Desde el punto de vista económico, es preferible utilizar suelos locales. Si son los adecuados, pueden utilizarse sin tratamiento químico o aditivos. La compactación adecuada de estos suelos incrementará sustancialmente sus capacidades de carga y controlará otros factores como la permeabilidad, capilaridad, contracción y dilatación.

El equipo a utilizar dependerá del tipo de suelo a compactar. Generalmente se especifican suelos granulares y no cohesivos como material para la base y sub-base. Los compactadores de tambor liso o neumáticos son los más utilizados para esta aplicación.

### **Suelos tratados (Estabilización del suelo)** –

La mezcla de químicos con suelos naturales o importados puede mejorar sustancialmente la estabilidad del suelo y sus características de carga. A esto se le llama estabilización del suelo

Una vez que se ha mezclado el limo o cemento con el suelo, se deberá utilizar un compactador vibratorio para compactarlo. El tipo de compactador a utilizar dependerá de las características originales o no tratadas del suelo, pero en general se deberá utilizar un compactador vibratorio de 15 toneladas (33,000 lb.) o más. Cuando el volumen de suelo cohesivo sea grande, el compactador de apisonamiento podría resultar más económico que el vibratorio. Los volúmenes más pequeños pueden compactarse mediante compactadores neumáticos.

Se recomienda efectuar una prueba de adecuación de estabilidad al inicio del trabajo para verificar que los resultados sean satisfactorios.

**Piedra triturada** – Especificaciones en la obra pueden requerir piedra triturada bien gradada como material para la base y la sub-base. El uso de este material permite controlar la graduación durante el proceso de triturado y cumplir con las especificaciones. La piedra triturada generalmente es más fácil de dispersar y compactar que los suelos finos. Además, los resultados de la compactación son más predecibles. Sin embargo, las ventajas de estas compactaciones se ven desplazadas por el gasto del triturado y acarreos frecuentes al lugar del proyecto.



*La estabilización del suelo mejora la calidad del mismo.*

La piedra triturada usualmente se acarrea a la obra en camiones con tolva y se coloca en el rasante con una motoniveladora o máquina esparcidora. El material para la base se distribuye y coloca en capas de 150-250 mm (6-10 in). Una vez distribuido se compacta mediante un compactador de tambor liso (estático o vibratorio) o neumático.

**[ CONSEJOS PARA LA COMPACTACIÓN DE SUELOS ]**

A pesar de aparentar ser sencillo, la compactación de suelos puede ser uno de los elementos más difíciles en cualquier proyecto de construcción. Los fabricantes ofrecen opciones en sus equipos de compactación los cuales permiten al operador ajustar la vibración, frecuencia y amplitud de la máquina para cumplir con las especificaciones de la obra.

No existe una manera fácil para ajustar los parámetros de operación de un compactador que le correspondan al material que se esté compactando. El "ensayo y error" es frecuentemente el mejor método. Obviamente, el usuario necesitará seleccionar un compactador de tamaño adecuado (ancho del tambor, peso, etc.) para cumplir con los requerimientos de producción. Sin embargo, el esfuerzo máximo de compactación se logra experimentando con las variables que el operador puede controlar (frecuencia, amplitud y velocidad de rodamiento), analizando el desempeño y haciendo ajustes.

Los fabricantes están integrando más tecnología a sus máquinas con el objeto de apoyar al operador a maximizar la eficiencia. Sin embargo, muy a pesar del auge y sofisticación de la tecnología, los mejores resultados de la compactación de suelos se logran a través de revisar algunos de sus principios básicos comprobados por años en la construcción de proyectos. A continuación ofrecemos algunos consejos como guía básica.

**¿QUÉ COMPACTADOR UTILIZAR PARA LA APLICACIÓN?**

**MATERIAL COHESIVO**

*Capas delgadas*

Compactador de un tambor (pisón)



**MATERIAL FINO**

*Sensible al agua*

Compactador de un tambor, liso o de pisón



**MATERIAL DE FRICCIÓN**

*(arena 0,063-2 mm/0.002-0.07 in)*

*Drenado libre si es contenido fino < 7%*

Compactador de un tambor, de tándem, de llanta neumática



**DRENAO LIBRE, GRANO GRUESO**

*Material de fricción*

Compactador de un tambor, compactador tándem



**GRANO GRUESO**

*(grava 2-63 mm/0.07-2.5 in)*

*Drenado libre*

*Material de fricción*

Compactador de un tambor, compactador tándem



**MATERIALES GRUESOS**

*Partículas pesadas*

Placas grandes, Compactador grande de un tambor (>12.7 toneladas)



	<b>Permeabilidad</b>	<b>Soporte para cimientos</b>	<b>Subrasante</b>	<b>Expansivo</b>	<b>Dificultad de compactación</b>
<b>Grava</b>	Muy alta	Excelente	Excelente	No	Muy fácil
<b>Arena</b>	Mediana	Bueno	Buena	No	Fácil
<b>Limo</b>	Mediana baja	Pobre	Pobre	Algo	Algo
<b>Arcilla</b>	Ninguna+	Moderado	Pobre	Difícil	Muy difícil
<b>Orgánico</b>	Baja	Muy pobre	No aceptable	Algo	Muy difícil

### **Uniformidad de las capas, velocidad y patrón de rodamiento**

Las estructuras de edificios y carreteras dependen no solo de que las bases del suelo estén compactadas conforme a las especificaciones, sino que también estén compactadas uniformemente. Las variaciones en la densidad de la base pueden producir baches o surcos de las llantas en carreteras así como asentamiento de los cimientos de edificios. Una de las causas principales de la variación en la densidad del suelo es el uso de diferentes tipos de suelos colocados contiguamente.

Debido a que los diferentes tipos de suelo se compactan de diferente manera y rinden diferentes resultados de compactación, se deberá hacer el esfuerzo de utilizar materiales similares en cada capa durante la construcción. Si se requieren diferentes tipos de material, trate de utilizar el mismo tipo en cada capa. No utilice diferentes materiales en un esparcido horizontal. Esto es importante si se desea una compactación uniforme.

Otra de las causas de la variación en densidad es la inconsistencia del contenido de humedad. Debido a que es más difícil compactar suelos demasiado secos o demasiado mojados, siempre se deberá lograr el contenido óptimo, conforme se determine a través del Ensayo Proctor, durante los trabajos de compactación y en toda la obra. Esto producirá suelos más uniformes y densos posibles.

Usualmente no se tiene un control estricto del grosor de la capa, excepto quizá de la capa de base debajo de la superficie del pavimento. Si hay consistencia en todos los demás factores, tales como el contenido de humedad y tipo de material,

**El espesor de la capa** – La tecnología del compactador avanza continuamente y ofrece mayores opciones y variaciones al proceso de compactación. Sin embargo, aún con el compactador más avanzado y los mejores esfuerzos de compactación, las capas gruesas de material resultarán menos densas que las capas más delgadas. Hay excepciones a esta regla, pero siempre se deberá tratar de lograr un espesor que optimice los índices de producción con base en la densidad requerida y el mínimo número de pasadas del compactador.

El estado de la capa anterior o base subyacente también afecta la compactación. Una capa subyacente no compactada a conciencia tendrá áreas relativamente suaves y por consiguiente, la compactación de la siguiente capa tendrá variaciones. La compactación de cualquier y todas



el espesor uniforme de las capas producirá una densidad uniforme en toda la obra. Desatender el espesor de las capas podría incurrir en incumplimiento de las especificaciones de la obra.

Otros factores que pueden afectar la compactación y a los que no se le da la debida atención son la cobertura y el número de pasadas. Los parámetros tales como el número de pasadas, velocidad del compactador y ajustes de la vibración se pueden controlar con facilidad. La tecnología de compactación inteligente, como el Control de Compactación de Cat con mapeo por Sistema Satelital de Navegación (GNSS), puede proporcionar una referencia visual para asegurar una cobertura y número de pasadas adecuadas. El recubrimiento uniforme es más eficiente y será más exitoso que la compactación de material de forma aleatoria.



las capas deberá ser uniforme y a conciencia para asegurar que las capas sucesivas se compacten exitosamente.

**Esfuerzo de compactación** – El esfuerzo de compactación es la cantidad de energía aplicada al suelo para reacomodar y compactar sus partículas. La modificación de los parámetros de la máquina, tales como peso, ancho, presión de las llantas, amplitud de la vibración y frecuencia, pueden cambiar el esfuerzo de compactación. Algunos de estos parámetros se pueden ajustar en una máquina. Los demás parámetros, como el ancho por ejemplo, pueden requerir de otras máquinas para poder alterar este esfuerzo. Todo proyecto requiere que se conozcan las dimensiones de estos parámetros.



**Velocidad de operación** – En general, la velocidad de desplazamiento juega un papel importante en la productividad de la construcción. A mayor velocidad, más rápido se realiza el trabajo. Sin embargo, con los compactadores vibratorios, a diferencia de los demás tipos de compactadores, la productividad generalmente incrementa cuando se reduce la velocidad de desplazamiento. Existe una velocidad óptima y económica que permite que un compactador logre los resultados de compactación requeridos.



**Reglas generales de la colocación y compactación de suelos** – A continuación ofrecemos reglas generales que usted, el gerente de obra y los operadores deberán tener presentes al iniciar cualquier proyecto de compactación.

- Al colocar una capa nueva, distribuya el material uniformemente por toda el área. Evite colocar suelos con exceso de humedad. Distribuya el material con una topadora a baja velocidad y perfile. No entierre las capas saturadas con material nuevo.
- Las cavidades superficiales o áreas con separaciones a la vista deberán repararse agregando material bien graduado de la misma composición.
- Inmediatamente después de haber distribuido el material, compacte el suelo comenzando por la parte exterior y desplazándose hacia el centro del área.
- El terraplén/áreas de acotamiento también deberán compactarse. Compacte el acotamiento comenzando por el borde exterior y desplazándose hacia el centro del área. Allane y selle la superficie.
- Al trabajar con materiales susceptibles al clima, el suelo a colocar deberá tener una pendiente lateral de aproximadamente 6 por ciento para evitar que se acumule el agua en la superficie.
- En climas adversos, utilice una compactadora de un solo tambor para compactar a lo largo de una franja. Al terminar, continúe con la siguiente franja y repita el proceso hasta compactar toda la superficie de la capa. Cerciórese de allanar y sellar la superficie al final del día para evitar que el agua se filtre.
- Al compactar una base flexible, resulta conveniente utilizar una amplitud baja y una frecuencia alta, si la base es lo suficientemente rígida. Utilice una amplitud alta y frecuencia de mediana a baja cuando la base se esté compactando junto con la primera capa.
- La combinación de una compactación estática y vibratoria – primero la vibratoria, seguida de la estática – puede rendir mejores resultados.

## [ MÉTODOS PARA MEDIR LA COMPACTACIÓN ]

La densidad ha sido el método tradicional para cuantificar la compactación del suelo en el laboratorio y también ha sido el método histórico más común para establecer y medir los requerimientos de compactación en campo. Las pruebas de laboratorio (como el Proctor) determinan el contenido de humedad a través del cual se produce la densidad máxima. Las densidades de las pruebas de campo que se esperan lograr se especifican como un porcentaje de la densidad seca máxima de laboratorio.

Generalmente, las densidades requeridas para los terraplenes son del 95 por ciento, según el Estándar Proctor, y hasta 100 por ciento para carreteras, según el Ensayo Proctor Modificado. Asimismo, el contenido de humedad deberá estar dentro del rango de contenido óptimo de humedad que el laboratorio determine.

Siempre se ha requerido realizar pruebas de campo en todos los puntos para asegurar el cumplimiento de las especificaciones de los dos elementos importantes – densidad anticipada y contenido de humedad – en toda la obra de construcción. Estas pruebas también indican la efectividad del equipo de compactación y los métodos de construcción utilizados. Recientemente se han estado aceptando los métodos de los sistemas de medición de la compactación integrados en las unidades compactadoras como medio para determinar la calidad de compactación en la obra.

Hay muchas autoridades que ahora requieren lo que ellos llaman, “compactación inteligente”. Es decir, la combinación de un sistema de medición de la compactación integrado en unidades compactadoras y de un sistema de mapeo para relacionar las mediciones del sitio y facilitar información para el análisis y documentación posterior.

## HISTORIA DE LA EVOLUCIÓN DE LAS MEDICIONES DE COMPACTACIÓN



**Métodos históricos**



**Medición integrada en la unidad compactadora**



**Compactación inteligente**

- Control del proceso / Especificaciones del proyecto
- “Prueba punto por punto”
  - Troxler / Densímetro nuclear
  - Penetrómetros
  - Deflectómetros
  - Placa de carga

Relativamente precisa

Normalmente las muestras tomadas equivalen a menos del 1% del área total

- Acelerómetro
  - Potencia a la tracción (MDP)
- Indicaciones al operador en tiempo real sobre la rigidez o resistencia a la carga
- Difícil de correlacionar con las mediciones históricas de “punto a punto”

Variabilidad de medición en ciertos tipos de suelo o aplicaciones

- Capacidad de mapeo satelital
- Relaciona las medidas de compactación de los sistemas integrados en las unidades compactadoras y datos en éstas con la ubicación exacta de donde se tomaron
- Proporciona mapas detallados para visualizar el trabajo realizado
- Proporciona información para su análisis y documentación

A continuación se presentan los métodos de medición más comunes. Tenga presente que cada método mide las propiedades del suelo de manera diferente (p.ej., densidad, resistencia, etc.) y que intenta hacer una correlación entre las pruebas para tener

un entendimiento físico de las diferencias. Además, la naturaleza misma de los procedimientos de prueba “punto a punto” requiere que se asuma que sus resultados aplican para todas las áreas adyacentes que no se probaron o para toda la obra en sí.

**Métodos de medición en campo (histórico) –**

*Medidas relacionadas con la densidad del suelo:*

Utiliza dos métodos básicos para medir la densidad del suelo en el campo:

**1. Medir la respuesta del suelo a partículas radioactivas con un aparato llamado Troxler o “densímetro nuclear”.**

Estos aparatos se convirtieron en el método más común para medir la densidad, pero tienen la desventaja de que se requiere de una licencia para poderlos utilizar, supervisión constante y de pruebas a la fuente de radiación nuclear en el aparato. También requieren se tramite el permiso para poderlos transportar.

El aparato indica el contenido de humedad en el suelo a una profundidad aproximada de 50 mm (2 in) y densidad a una profundidad de 300 mm (12 in) o menor mediante la emisión de neutrones y rayos gama, respectivamente. La prueba es rápida y se puede realizar sin alterar el material. Los suelos homogéneos producen mejores resultados.

Existen tres procedimientos básicos para medir la densidad mediante un calibrador nuclear – transmisión directa, retro dispersión y el “método de vacíos”.

El método de transmisión directa proporciona mediciones más precisas, menor error en la composición y menor error en la aspereza de la superficie. Se puede utilizar para realizar pruebas a varias profundidades entre los 50-300 mm (2-12”). El aspecto más importante de este método es que el operador tiene control directo sobre la profundidad a medir.

El método de la retro dispersión elimina la necesidad de hacer un orificio en el suelo compactado debido a que la unidad descansa sobre la superficie. Sin embargo, las mediciones no son precisas y los errores en la composición son frecuentes. Este método da mejores resultados en profundidades superficiales de 50-75 mm (2-3 in).



*Troxler o densímetro nuclear*

El método de vacíos rinde menos errores de composición y se puede utilizar en modo directo o de retro dispersión. El aparato se utiliza a cierta distancia de la superficie para reducir errores en la composición, pero no es tan preciso como el método de transmisión directa.

Las limitaciones en cuanto al uso de equipo nuclear son las precauciones que se tienen que tomar en cuanto al manejo de material radioactivo y al hecho de que a veces los suelos orgánicos o materiales con alta salinidad y/o contenido radiactivo arrojan lecturas falsas. Las vibraciones del suelo ocasionadas por equipo de construcción también pueden ocasionar errores en las mediciones.



La precisión del método del cono de arena está comprobada.

**2. Extraer una muestra de suelo para pesar su volumen y medir el volumen del orificio de donde se extrajo la muestra.** El peso de una muestra de suelo se puede medir directamente siempre que tenga una báscula bien calibrada a la mano. El volumen del orificio de donde se extrajo la muestra no es fácil de medir, pero existe un par de procedimientos utilizados los cuales rinden una exactitud razonable. Lo siguiente describe dos ejemplos:

*El método del cono de arena* – Este método se compone de varios pasos y lleva más tiempo que el método mediante el Troxler (densímetro nuclear), sin embargo, su precisión está comprobada. Algunas veces se utiliza junto con el método nuclear para verificar la calibración del Troxler. Este método se enfoca en medir el volumen de la arena que se requiere para llenar el orificio de donde se extrajo la muestra de suelo. Si la arena fluye fácilmente dentro del orificio y su densidad es consistente, quiere decir que la densidad de la arena no cambiará de manera significativa al ser transferida del recipiente al orificio.

*El método del globo de agua* – A este método también se le conoce como la Prueba de Densímetro de Washington. Los primeros tres pasos de la prueba (extraer una muestra, pesarla y secarla) son los mismos que se efectúan en el método del cono de arena. De esta manera se calcula el contenido de humedad.

Sin embargo, en lugar de medir el volumen del orificio que se excavó para extraer la muestra, como en el método de cono de arena, se utiliza el Densímetro de Washington. El densímetro, que es un aparato lleno de líquido, se coloca sobre el orificio y el globo que se sujeta a la placa base se coloca dentro del orificio. Se abre la válvula a un costado del aparato y el líquido calibrado entra al globo. Al llenarse el globo toma la forma del orificio. El densímetro está calibrado para que su lectura muestre el volumen de líquido y, por ende, el volumen del orificio.

La densidad (peso por unidad de volumen húmedo) se calcula dividiendo el peso de la muestra extraída entre el volumen del orificio – tal como en el método del cono de arena. El peso por unidad de volumen seco también se puede calcular dividiendo el peso por unidad de volumen húmedo entre uno más el contenido húmedo.

Las limitaciones de este método son: el tiempo que se lleva para obtener resultados y el hecho de que la exactitud depende de la capacidad del globo para tomar la forma de las irregularidades de las paredes del orificio.



Utilizando el método del penetrómetro dinámico de cono

*Mediciones relacionadas con la resistencia y rigidez del suelo* – La densidad del suelo ha sido la medición histórica de la compactación para establecer requerimientos y calificar resultados. Sin embargo, se ha acrecentado la tendencia de utilizar las mediciones de las resistencias de suelos las cuales se relacionan directamente con los requerimientos del diseño. Existen varias mediciones de resistencias utilizadas en campo. Algunas de las cuales (más no todas) se describen en esta guía. Estas mediciones utilizadas en campo se clasifican en tres categorías:

**1. Resistencia del suelo ante la penetración –**

El *Penetrometro Dinámico de Cono (DCP)*, por sus siglas en inglés es el método comúnmente utilizado para medir la penetración del suelo. La prueba consiste en medir la fuerza/energía o resistencia al corte/fricción que se requiere para insertar un pisón pequeño dentro del suelo con un martillo de peso fijo que se deja caer a distancia conocida. Este aparato se puede utilizar para estimar la “Relación de Soporte de California” (CBR) y valores en Newtones por milímetro cuadrado (libras por pulgada cuadrada) a una profundidad de 1830 mm (72”). El uso no adecuado de la caída del martillo o el conteo incorrecto de golpes y el cambio en profundidad por golpe (o series de golpes), ocasionarán mediciones incorrectas. El uso en suelo rocoso también produce resultados dudosos.

El tamaño común del pisón es de 20 mm (¾ in.) en su base y punta en ángulo de 60 grados. El pisón penetra dejando caer un peso que golpea una placa que después imparte una fuerza dinámica al pisón haciéndolo penetrar en el suelo. La distancia de penetración se registra por golpe. Los suelos más duros requerirán más golpes para hacer penetrar el pisón y el número de golpes y distancia de penetración se registra.

El DCP tiene la ventaja de medir la resistencia del suelo a mayores profundidades que otros métodos. Un pisón puede penetrar 1 m (39”) y más allá, aunque la fricción del suelo en el conducto del penetrómetro puede influenciar las lecturas – particularmente después de un metro de profundidad. El DCP no funcionará en materiales muy rígidos tales como un suelo estabilizado con limo después de ser curado. Es físicamente intenso y puede ser extenuante por el uso repetitivo.

## 2. Respuesta del suelo por caída de carga –

El principio subyacente es: los suelos más rígidos causarán más rebote en masas que se dejan caer en su superficie. El instrumento de medición se llama deflectómetro liviano (LWD, por sus siglas en inglés). La versión más grande se llama deflector de impacto (FWD, por sus siglas en inglés).

El *deflectómetro liviano* mide la rigidez del suelo o módulo de elasticidad de la superficie de las capas de construcción dejando caer un peso fijo a distancia conocida sobre una placa equipada con un acelerómetro y otros sensores. Cuando se detecta la deflexión o movimiento de la placa, el módulo dinámico de elasticidad del suelo se calcula en mega pascales (MPa) a una profundidad aproximada de 150 mm (6 in.). El uso requiere que la superficie esté allanada. Las pruebas muestran que los deflectómetros de diferentes fabricantes producen diferentes resultados bajo las mismas condiciones de suelo.

El *deflectómetro de impacto (FWD)* es una versión más grande del dispositivo móvil antes mencionado. El FWD se monta en camión y su transportación no es sencilla, pero utiliza el mismo principio de golpear una placa más grande creando una zona más grande de influencia y midiendo mayores profundidades. Mientras que el LWD puede medir hasta una profundidad de 150 mm (6”), el FWD es capaz de transmitir energía a una profundidad de 1 m (39”) similar al impacto creado por un compactador vibratorio.



*Deflectómetro liviano*

## 3. Resistencia del suelo ante carga estática –

Este método es similar a las pruebas de altura de caída debido a que mide la rigidez del suelo a partir de la superficie, pero diferente debido a que utiliza presión estática en lugar de fuerza dinámica. Debido a que el propósito de la compactación de suelo es producir un suelo rígido, se necesitará utilizar demasiada fuerza para deformarlo con presión estática. Para medir la rigidez del suelo se requiere de una placa de aproximadamente el mismo tamaño al de la profundidad deseada de medición – esto significa que se necesita una placa cercana a los 30 cm (12”) de diámetro en lugar de una placa en el rango de centímetros o pulgadas.

*Prueba de la placa de carga* – Hay varios dispositivos disponibles con placas de varios diámetros. Mientras más grande sea el diámetro de la placa, se necesitará mayor fuerza para crear un movimiento descendente mensurable dentro el suelo. Cuando se carga la placa, se mide y traza la deflexión de una fuerza dada. Esto producirá el módulo del suelo (rigidez) e indicará la capacidad de resistencia del suelo. Las pruebas con placas mayores requieren miles de libras de fuerza para llevar la placa – típicamente de 300 mm (12 in.) – dentro del suelo.



*Preparando una prueba de placa de carga*

Usualmente se utiliza equipo de construcción disponible como fuente de la carga. Las mediciones de esta prueba se utilizan directamente para diseñar el grosor del pavimento.



*Rodado de comprobación*

*Otras mediciones en campo* – Finalmente, existen otros métodos de medición en campo que se utilizan para medir la compactación, pero que no caen dentro de las categorías mencionadas anteriormente. Estos métodos se han utilizado por muchas décadas de manera individual o junto con otras pruebas para evaluar si los suelos tienen la capacidad para soportar cargas. Muchos aún se utilizan.

**1. Rodado de comprobación** – Este método normalmente se utiliza en América del Norte como método alternativo para hacer pruebas sobre una zona y así identificar directamente la respuesta de la superficie compactada a una carga aplicada. La prueba puede identificar zonas suaves y asegurar la capacidad uniforme para soportar una carga. El proceso consta de rodar una masa pesada sobre ruedas en una superficie compactada y medir la profundidad de los surcos o deflexión. El exceso de depresiones indica una compactación no adecuada.

El rodado de comprobación no es una medición directa de la resistencia del suelo, como los métodos antes descritos, pero puede ser una medición más directa de la calidad de la compactación cuando el propósito de la compactación es sencillamente incrementar la rigidez del suelo para estructuras tales como carreteras y estacionamientos. Si el peso del rodado de comprobación no hace surcos en la base del suelo, entonces no presentará deformaciones al tráfico. Es decir, se asume que la carretera está bien drenada y permanecerá estable con el paso del tiempo.

De todos los procedimientos tradicionales para probar la compactación, el rodado de comprobación es el método que facilita muestras de mayor tamaño ya que económicamente realiza pruebas sobre superficies mayores en comparación con las pruebas realizadas en zonas específicas.

**2. Horno portátil para medir la humedad del suelo** – El horno portátil es un aparato utilizado para hacer mediciones del contenido de humedad en el suelo y correlacionarlas con las mediciones de resistencia a la carga arrojadas por otros aparatos. Las mediciones de los otros aparatos antes mencionados no son válidas si no se conoce el contenido de humedad en el suelo.



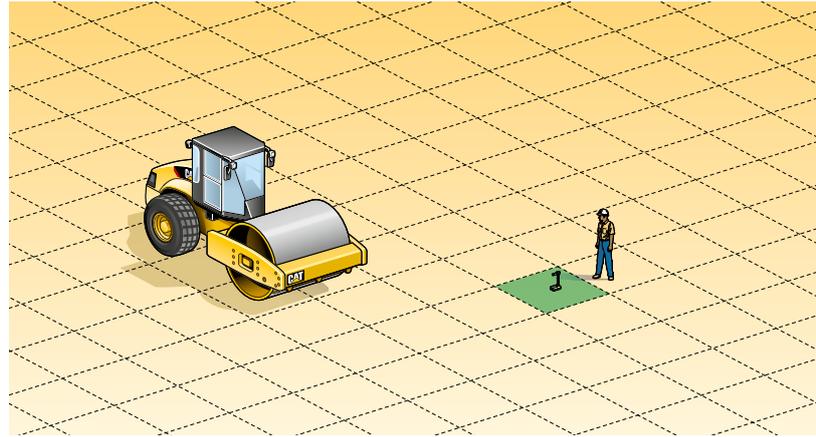
*Horno portátil para medir la humedad en el suelo*

### Métodos de los sistemas de medición de la compactación integrados en unidades compactadoras

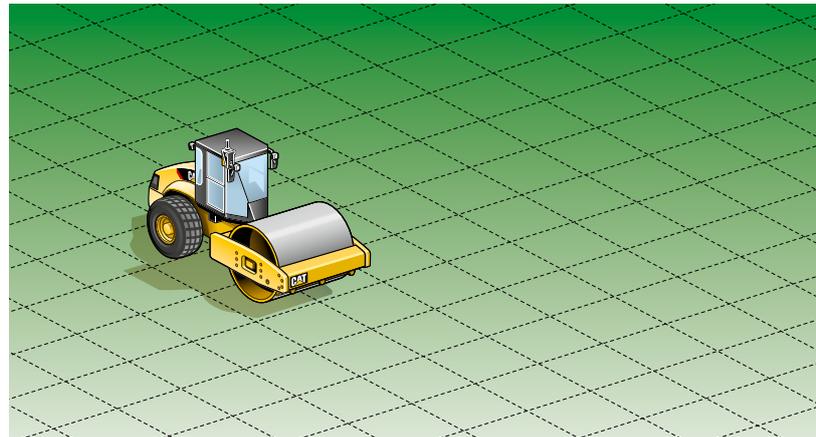
– Tradicionalmente la compactación ha sido un ejercicio de prueba y error. Los operadores que carecen de información confiable sobre las condiciones del suelo, hacen uso de su experiencia y sentidos para juzgar que el suelo ha quedado compactado. Hay ingenieros que determinan procedimientos para producir resultados satisfactorios, pero solo si se siguen adecuadamente. Las pruebas al suelo compactado se efectúan en un área previamente determinada. Cualquier resultado no satisfactorio es causa de retrabajo en esa área en particular. Además de estas pruebas, también se utiliza la prueba de rodado de comprobación en algunas áreas. Esta prueba normalmente se realiza mediante un tráiler con carga pesada o un camión de volteo. Como se mencionó anteriormente, el rodado de comprobación se desplaza sobre un sitio y la profundidad de los surcos formados por las ruedas indica la zona de compactación pobre.

Sin importar el método que se utilice para verificar la calidad de la compactación, los operadores básicamente se pasan adivinando la calidad de su trabajo conforme avanza el proyecto. Los métodos para verificar la calidad en ciertas áreas o la prueba de rodado de comprobación solo verifican áreas pequeñas de toda el área compactada en sí. Esto deja abierta la posibilidad de que hay muchas áreas que no están compactadas adecuadamente; un problema que puede resultar caro si en un futuro ocasiona fallas en el edificio o carretera.

Los sistemas de medición de la compactación integrados en unidades compactadoras cambiaron todo esto ya que facilitan información a los operadores sobre las condiciones de la compactación. Los operadores capacitados pueden utilizar estos sistemas para determinar cuándo se ha cumplido con las especificaciones de la compactación o las áreas que puedan presentar problemas de humedad. Esos sistemas avisan la presencia de objetos enterrados que pueden afectar la calidad de la compactación tales como bolas de arcilla, troncos de árboles o rocas grandes.



*Los sistemas de medición tradicionales analizan solamente una pequeña porción del área total compactada.*



*Los sistemas integrados en unidades compactadoras analizan toda el área compactada.*



*Los sistemas integrados en las unidades compactadoras predicen o indican la rigidez del suelo.*

*¿Qué mide la tecnología de compactación integrada en la unidad compactadora? Es importante entender que estos sistemas no miden la densidad del suelo, a pesar de que este término se utilice frecuentemente cuando se analizan los resultados. Debido a la variabilidad del trabajo de compactación, estos sistemas no miden nada directamente. Lo que hacen es medir un número de factores que proporcionan una predicción o indicación sobre la rigidez del suelo. Como se mencionó anteriormente, la rigidez es la capacidad de un suelo con cierta forma y composición de resistir la deformación o deflexión bajo la influencia de una carga. Es el mejor*

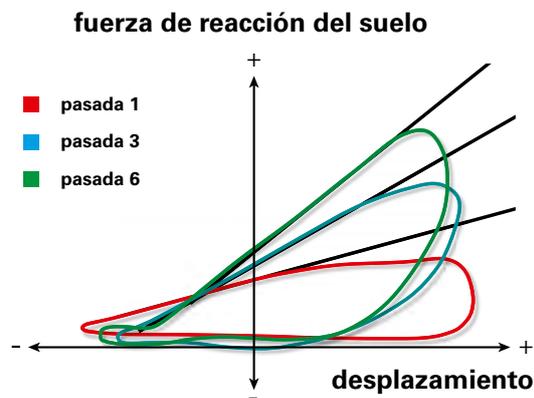
indicador de la capacidad de resistencia a la carga en comparación con la densidad de material debido a que hay ciertos materiales densos que pueden ser friables bajo cargas. El material necesita ser flexible pero no débil.

Existen dos tipos de tecnologías de medición disponibles: el sistema de acelerómetro y el sistema de energía. Ambos toman medidas de manera totalmente diferentes y, por consecuencia, lo que miden también es diferente.

**Medición por acelerómetro** – Los sistemas de acelerómetro los ofrecen muchos fabricantes. Estos sistemas utilizan un acelerómetro montado en el tambor para medir la reacción del suelo que recibe golpes de un tambor vibratorio. Existen dos métodos diferentes para realizar estas mediciones.

*El primer método se llama Desplazamiento de Fuerza. Este método utiliza un acelerómetro montado en el eje del tambor para medir el desplazamiento del tambor. Basado en la aceleración del tambor, el conocimiento de las características del tambor, la vibración y el peso de la máquina así como la distribución, se calcula la fuerza que se requiere para lograr cierto desplazamiento. Mientras más rígido sea el suelo, mayor fuerza se requerirá para hacer que el tambor aplane el suelo a cierta profundidad; o, una fuerza constante ocasionará que el tambor aplane menos el suelo al irse tornando más rígido. Debido a que el área de contacto del tambor varía al impactarse contra el suelo, este método produce mediciones estimadas y no exactas.*

**DESPLAZAMIENTO DE FUERZA**



*A mayor inclinación de la curva, mayor la rigidez del suelo*



*Los acelerómetros miden la reacción del suelo al ser golpeado por un tambor vibratorio.*



## Sistema de medición

- 1. Acelerómetro
- 2. Controlador
- 3. Pantalla de cristal líquido

## Mapeo por sistema SBAS

- 4. Antena del GNSS
- 5. Pantalla a color
- 6. Receptor del GNSS
- 7. Sensor de ángulo (opcional)

## Actualizar a RTK

- 8. Kit del radio

## VALOR DE MEDICIÓN DE LA COMPACTACIÓN (CMV)

El Segundo método se llama Valor de medición de compactación (CMV, por sus siglas en inglés). Inventado por la compañía sueca, Geodynamik, en los 70's. Este método es actualmente utilizado por Caterpillar y otros fabricantes. En lugar de intentar calcular el desplazamiento del tambor, el acelerómetro montado en el tambor mide los rebotes o fuerza G en la frecuencia de vibración y también mide las fuerzas G a dos veces la frecuencia vibratoria del tambor (a esto se le conoce como la "primera armónica"). Al poner dos valores en la fórmula, el valor de compactación se calcula para indicar la rigidez del suelo referido como Valor de medición de compactación (CMV).

Dicho de otra manera, el principio básico de la medición se enfoca en el cambio de la respuesta dinámica del compactador conforme el suelo incrementa su rigidez. El sistema de acelerómetro,

en cierto modo parecido al deflectómetro de impacto, mide qué tanto rebota el tambor del compactador con respecto del suelo. Los suelos no compactados tienden a absorber la energía vibratoria, pero conforme el suelo se endurece con las pasadas adicionales de la compactadora, la energía comienza a reflejarse en la superficie y el tambor tiende a rebotar más rápido debido a la fuerza vibratoria. La medición de este rebote incrementado puede traducirse como indicador de compactación.

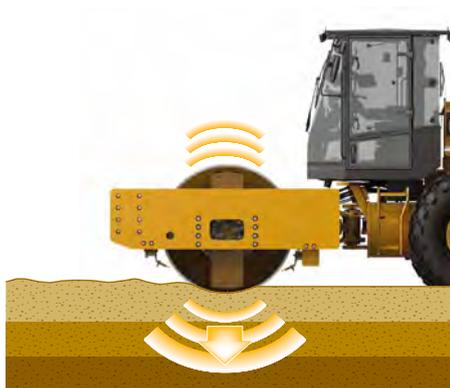
Conforme se endurece el suelo, el rebote se intensifica. Cuando la frecuencia resonante del suelo alcanza la frecuencia vibratoria de la máquina, el suelo ha llegado a su máxima rigidez y ya no aceptará más energía de compactación. En este punto la máquina comenzará a desacoplarse. Independientemente del método de medición que se utilice, los sistemas de acelerómetro vigilan qué tan cerca está la máquina en desacoplarse. A esta medida se le llama Valor de Medición de Resonancia (RMV, por sus siglas en inglés) y se utiliza para evaluar qué tan válida es la medición de la rigidez – mientras más se acerca la máquina al desacoplamiento, menos válida será la medición.

Los sistemas de acelerómetro miden la profundidad de un volumen de suelo, aproximadamente entre 1 – 1.2 m (36-48 in.), dependiendo de la composición del suelo y las características del compactador. Esta lectura se “promedia” y por lo tanto no es posible aislar las indicaciones exactas de la rigidez de cualquier profundidad dada. No obstante, la lectura de la profundidad es excelente en la localización de objetos enterrados – en la sub-base, por ejemplo – que pueden afectar la calidad del trabajo y el rendimiento a largo plazo de la estructura.

Una de las desventajas del sistema de acelerómetro es que el tambor debe estar vibrando para poder tomar medidas. Esta desventaja hace que el sistema no sea el adecuado para suelos cohesivos y semicohesivos debido al efecto amortiguante de los materiales. Por esta razón, estos sistemas no son efectivos en compactadores de pisón o en aplicaciones que solamente utilizan la compactación estática ya que no se pueden tomar mediciones sin vibración.

Otra de las desventajas es la profundidad de la medición. Como se mencionó anteriormente, según el tipo de suelo y rigidez del material con el que se esté trabajando, la profundidad de la medición puede llegar hasta 1.2 m (4 ft.) y evidentemente mucho más profundo/grueso que cualquier otra capa que se esté compactando, Además, se está obteniendo el valor promedio de la rigidez de varias capas o inclusive la rigidez del material de la sub-base.

**CMV - ¿CÓMO FUNCIONA?**

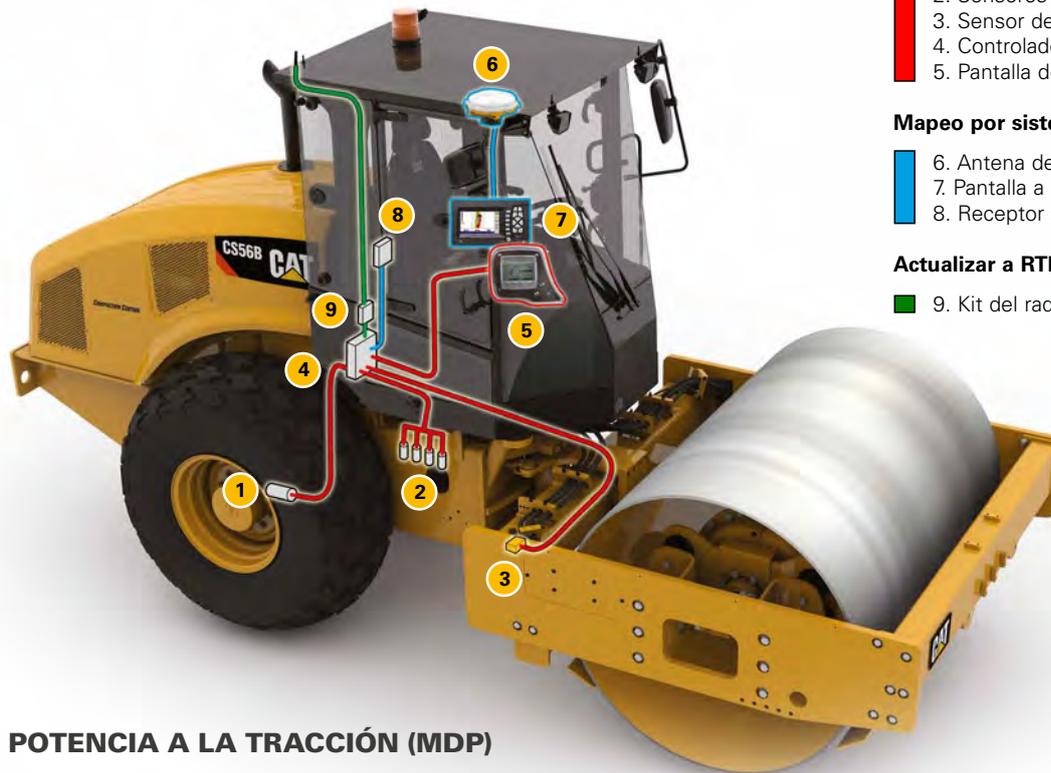


*Tambor vibratorio impartiendo energía vibratoria en el suelo.*



*El material responde con vibraciones detectadas y medidas por el acelerómetro.*

**El CMV calcula una indicación teórica de la rigidez del suelo.**



## Sistema de medición

- 1. Sensor de velocidad
- 2. Sensores de presión
- 3. Sensor de ángulo
- 4. Controlador
- 5. Pantalla de cristal líquido

## Mapeo por sistema SBAS

- 6. Antena del GNSS
- 7. Pantalla a color
- 8. Receptor del GNSS

## Actualizar a RTK

- 9. Kit del radio

## POTENCIA A LA TRACCIÓN (MDP)

*Medición por energía* – La segunda tecnología de medición disponible hoy en día mide la cantidad de resistencia de rodadura del compactador conforme se desplaza por el suelo. Se basa en el principio de que se requiere mayor energía para vencer la resistencia de rodadura en suelos blandos que en suelos densos. Las pasadas adicionales compactan el suelo e incrementan su rigidez y resistencia a la carga. Conforme el material gradualmente ofrece menos resistencia, el compactador requerirá menos energía para desplazarse sobre el área compactada. La resistencia de rodadura y cantidad de energía necesaria para vencerla están relacionadas con la rigidez del material. Solamente Caterpillar actualmente ofrece esta tecnología de medición de energía por compactación llamada “Potencia a la Tracción” de la máquina (MDP).

La medición de energía presenta muchas ventajas. El uso del MDP es similar al rodado de comprobación: a menor penetración de la llanta en el suelo, menor será la energía de desplazamiento. Por lo tanto, existe una relación estrecha entre el MDP y la profundidad de los surcos producidos por las pruebas de rodado de comprobación. También hay una relación estrecha entre el MDP y la rigidez del suelo, pero quizá la mayor ventaja de la medición de energía es que el cálculo es más tangible y directo y que se indica si el suelo es capaz de soportar una carga.

Si el suelo es lo suficientemente rígido como para minimizar la energía que la máquina compactadora transfiere, entonces es lo suficientemente fuerte para cumplir con los requerimientos de compactación. Esta relación, mensurable en el compactador vibratorio y el estático, es la razón subyacente de la compactación de suelos.

Debido a que este método no requiere de la medición de la energía vibratoria en el cálculo de la rigidez del suelo, funciona bien con todos los tipos de suelo, incluyendo el cohesivo y no cohesivo. Funciona bien con el compactador de pisón así como con el de tambor liso. Funciona con el sistema vibratorio activo o inactivo. Por estas razones, los sistemas de energía son mucho más versátiles y pueden utilizarse en más aplicaciones que los sistemas de acelerómetro.

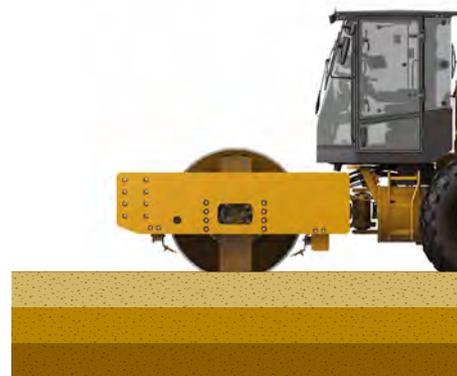
La medición de los sistemas de energía no alcanza la misma profundidad que la medición de los sistemas de acelerómetro; miden aproximadamente de 30-60 cm (12-24 in.), dependiendo de la composición del suelo y características del compactador. Esta profundidad se asemeja a la profundidad de una capa típica, por lo tanto miden el suelo que se está compactando en lugar del promedio de algunas capas y/o material de sub-base debajo de la capa que se está compactando. Esta profundidad también se equipara con la prueba de profundidad de aparatos portátiles, por lo tanto permite a los contratistas relacionarlos con seguridad.

En los sistemas de basados en la energía se presentan algunas desventajas. Las mediciones no son tan profundas, lo que a veces no los hace ser los más adecuados para identificar objetos enterrados o áreas en la sub-base de pobre compactación como los sistemas de acelerómetro. También, cuando se opera el sistema de energía y el sistema vibratorio encendido, el sistema no le avisa al operador que la máquina está por desacoplarse del suelo.

**MDP - ¿CÓMO FUNCIONA?**



*El desplazamiento en suelos suaves requiere mayor energía*



*El desplazamiento en suelos rígidos requiere menos energía.*

**El MDP mide la energía necesaria para vencer la resistencia de rodadura; una medición más tangible y directa de la rigidez del suelo.**

**Factores que influyen los resultados de la compactación proporcionados por los sistemas integrados de medición** – Como se mencionó anteriormente, la compactación vibratoria es un proceso complejo en el que varios factores influyen la fuerza de compactación requerida para alcanzar la compactación y densidad anticipadas. Con la tecnología para medir la compactación, los operadores producirán información del 100 por ciento de la superficie compactada en comparación con menos del 1 por ciento producida por los métodos/aparatos de pruebas portátiles. Esto le da al operador la capacidad para localizar áreas de compactaciones pobres o rígidas, tomar las acciones necesarias para remediarlas y llegar a un resultado final más homogéneo y de mayor calidad

con los datos de pruebas en campo conocidos, independientemente de la tecnología que se utilice. Se debe tener un entendimiento claro del efecto que cada factor produce para poder utilizar absolutamente todas las capacidades del sistema integrado. El conocer cómo es que cada factor influye en la medición, le ayudará al contratista a realizar mediciones consistentes con la menor cantidad de variaciones. Para este propósito conviene tener amplio conocimiento de tres factores primarios:

- Preparación adecuada del sitio de pruebas
- Método de pruebas e integración de datos
- Parámetros de la máquina

Existen varios factores que influyen los resultados del sistema integrado y la relación de éstos

## Preparación del sitio de pruebas

La preparación adecuada del sitio donde se ejecutarán las pruebas y el estricto control de las condiciones del material a examinar son de suma importancia. La falta de asegurar homogeneidad del material y uniformidad en la compactación del Subrasante y la materia prima puede afectar directamente la calidad y precisión de los datos que las pruebas arrojan.

### 1. Construcción de la base y sub-base utilizando varios materiales

– La base o sub-base a menudo se construye con varios materiales. Por ejemplo, digamos que una base compuesta por roca triturada se estriba en una base construida de arcilla relativamente suave. Al cubrirla con una capa gruesa de grava – de quizá 1 m (39 in.)- los CMV medidos sobre la base de roca serán considerablemente mayores que los valores de la base de arcilla. Las pruebas de densidad efectuadas con aparatos portátiles darán casi los mismos valores debido a que los aparatos no pueden medir más allá de la grava. La rigidez de la base tiene un efecto profundo sobre las mediciones con acelerómetros, pero también tienen un efecto limitado sobre las mediciones de energía.

Una base o sub-base más rígida hará que el material de relleno que descansa sobre ésta se compacte con mayor facilidad y a mayor grado. Es por ello que Caterpillar recomienda que se mapee o haga la prueba de rodado de comprobación al nivel más bajo de la excavación para determinar sus condiciones antes de colocar, distribuir y compactar material de relleno. Pudiera ser necesario corregir algunas áreas que estén considerablemente más rígidas o suaves que la mayoría de la obra. El objetivo es lograr uniformidad en la compactación y ésta requiere una base uniformemente compactada o sub-base con rigidez uniforme.



Preparando el sitio de pruebas

### 2. Tipo de suelo

– El tipo de suelo a compactar influye grandemente los resultados del CMV o MDP.

La razón de ello es que el índice de elasticidad e índice de amortiguación internas son muy diferentes en suelos finos y en suelos granulares. Esto afecta la respuesta del suelo a las vibraciones y por ende las mediciones que se toman.

### 3. Contenido de humedad

– Toda prueba de compactación deberá efectuarse sobre condiciones conocidas y aceptables. No se recomienda efectuar pruebas sobre material saturado con agua. El contenido de humedad en el suelo, frecuentemente presente en los sitios de las obras, es una variable que afecta enormemente los resultados de la compactación. También es la causa principal de las variaciones que arroja el CMV en el mismo tipo de suelo. El contratista tiene algo de control sobre este factor y puede ya sea agregar agua con la ayuda de una pipa de agua y mezclarlo o ararlo y dejarlo secar. Para una compactación de lo más eficiente, cada tipo de suelo tiene un contenido óptimo de humedad. En suelos arenosos, varía entre el 4 y 12 por ciento y en suelos arcillosos, entre el 9 y 22 por ciento.



Las medidas efectuadas por un sistema de medición de la compactación integrado en la unidad compactadora – indicaciones de la rigidez del suelo – se ven afectadas por la humedad en el suelo debido a que la humedad tiende a ocupar los espacios vacíos entre sus partículas. De haber más aire en estos espacios vacíos, la compresibilidad del aire disminuye la lectura. De haber más agua, su relativa incompresibilidad dará en una lectura alta. En algún punto, si hay demasiada humedad presente, ésta actuará como lubricante entre las partículas permitiéndoles deslizarse entre ellas. Esto nuevamente disminuirá el valor del CMV.

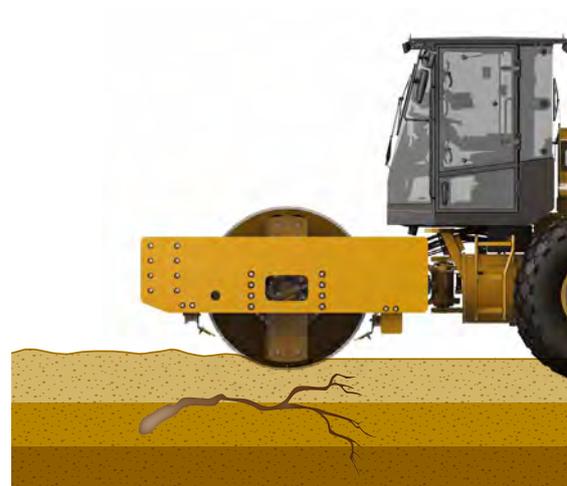
Una de las ventajas de utilizar la tecnología de medición de la compactación integrada en una unidad compactadora es que el contenido

de humedad en el suelo puede detectarse indirectamente por lo bien que el suelo se esté compactando. Por ejemplo, un compactador operando sobre un suelo granular le tomará más pasadas para llegar al valor que se pretende alcanzar conforme el suelo se seca; a mayor sequedad, mayores serán las pasadas. El operador podrá darle seguimiento en su pantalla y llamar a una pipa de agua para que acuda a tratar áreas secas específicas. En suelos húmedos, la fuerza de compactación de la unidad puede hacer que el agua migre de las capas inferiores a las superiores, dando como resultado lecturas reducidas. El operador puede abrir el suelo para permitir que el exceso de humedad se evapore.

**4. Objetos enterrados en el suelo** – Al estar compactando lo que aparentemente es una capa uniforme, el sistema de medición integrado ocasionalmente arrojará medidas más altas o bajas en cierta área con respecto a las zonas que le rodean. La primera respuesta pudiera ser analizar el área mediante un instrumento de lectura de superficies, tal como un densímetro nuclear o deflectómetro. Este tipo de análisis raramente producirá la misma variación de mediciones que el instrumento integrado debido a que estos tipos de aparatos no miden a la misma profundidad.

Una lectura alta arrojada por un sistema de medición de la compactación integrado en la unidad compactadora muy probablemente se deberá a una piedra grande o pedazo de concreto enterrado bajo el suelo, quizá a unos cuantos pies. Una lectura baja pudiera tratarse de una bola de arcilla o neumáticos enterrados bajo agregado granular. Las variaciones en las medidas integradas de compactación son reales, pero requieren excavar el área para determinar el objeto con precisión. Esto pudiera no ser práctico.

El uso de una sonda larga dentro del suelo o un penetrómetro dinámico de cono puede ofrecer una idea sobre la naturaleza de la irregularidad sin tener que excavar. Se deberá tomar una decisión en cuanto a si la variación ocasionará problemas a la superficie de la carretera una vez terminada. Las variaciones en la resistencia a la carga (rigidez) del suelo de carga pueden causar tensión al pavimento y reducción de su ciclo de vida útil.



**ADVERTENCIA:** Cuando se trabaje en sitios donde exista la posibilidad de haber minas sin explotar debajo la superficie del suelo, se recomienda utilizar un detector de metales antes de iniciar los trabajos de excavación y compactación.

## Método de pruebas e integración de datos

### 1. Correlación con un método de pruebas comprobado

– Los contratistas que no están familiarizados con los sistemas de medición integrados en las unidades compactadoras normalmente desean relacionar datos/mediciones con una metodología de compactación en campo. Las pruebas de densidad nuclear y de cono de arena han sido los estándares industriales por años y muestran alguna correlación, pero no miden las mismas propiedades de suelos o profundidades como los sistemas integrados de medición.

El método de la prueba de compactación en campo puede impactar directamente el nivel de correlación con un valor del sistema de medición de la compactación integrado en la unidad compactadora. El volumen efectivo medido por este sistema integrado (CMV o MDP) es considerablemente mayor que los métodos típicos de medición en campo. Ningún aparato típico para medir la compactación en campo mide con la misma profundidad, volumen o inclusive las mismas propiedades del suelo.

Debido a que son portátiles y al uso relativamente fácil, los siguientes métodos de pruebas en campo son los más comúnmente utilizados:

- Penetrómetro dinámico de cono – mide a mayor profundidad, pero indirectamente mide la resistencia al corte y fricción del suelo
- Deflectómetro liviano – el volumen efectivo de material probado es 1 por ciento en comparación con lo que un sistema integrado mide. Como tal, cualquier irregularidad de los materiales probados puede verse exacerbado y hacer más pronunciada la diferencia en volumen del material probado.

Las correlaciones entre los datos de los aparatos de medición y los sistemas integrados son variables, dependiendo de las pruebas utilizadas y de cuántas se efectúan. Cuando se intenta hacer la correlación de datos de los sistemas integrados con los de una prueba de campo típica, la correlación de datos más satisfactoria la arroja deflectómetro de impacto.

Cuando se utiliza la tecnología de medición de la compactación integrada en una unidad compactadora se debe tener presente que lo que se está midiendo – una indicación de la rigidez del suelo – cambia mientras se está midiendo.



Como resultado de esto, entre pasadas la lectura va cambiando. Esto puede presentar un problema para las agencias que intentan verificar los valores de las mediciones de compactación (CMV o MDP) mediante algunas otras pruebas de campo típicas.

Las pruebas posteriores a la compactación con aparatos portátiles pueden repetirse debido a que no son determinantes y no alteran el suelo. Una máquina equipada con un sistema integrado de medición altera el suelo con cada pasada debido a su peso. La prueba de placa de carga es la prueba que tiene un efecto similar conforme la estructura del suelo en sí cambia durante la medición.

Los valores de compactación de las unidades con sistemas integrados de medición son repetitivos conforme el suelo se aproxima a su estado final de compactación máxima. En ese momento habrá muy poco cambio en los resultados entre pasada y pasada. Sin embargo, si la estructura del suelo es algo frágil, los valores de compactación fluctuarán entre altos y bajos debido a que la estructura del suelo se acumula hasta cierto nivel y luego se rompe con la siguiente pasada. A esto se le denomina

“descompactación”, y sucede frecuentemente con ciertos tipos de suelos granulares.

**2. Cantidad de datos registrados** – El rango o número limitado de mediciones también puede afectar el nivel de correlación que ofrece la tecnología de medición integrada en unidades compactadoras. Se recomienda utilizar un rango bien desarrollado de resultados de pruebas de compactación en campo para compararlos contra los resultados del sistema integrado y evitar correlaciones de un solo punto las cuales no ofrecen suficiente información para una interpretación adecuada.

**3. Integración de datos** – El hacer la relación espacial de los resultados de pruebas en campo con los valores que arroja el sistema de medición integrado en una unidad compactadora de manera incierta puede resultar en variaciones y correlaciones pobres. Se recomienda prestar cuidado especial en la relación de puntos de datos relativos o utilizar un compactador con capacidades de mapeo/ integración de datos por GNSS que asocie los detalles de la posición del sitio de pruebas para correlacionar de forma adecuada los datos de las pruebas de campo.

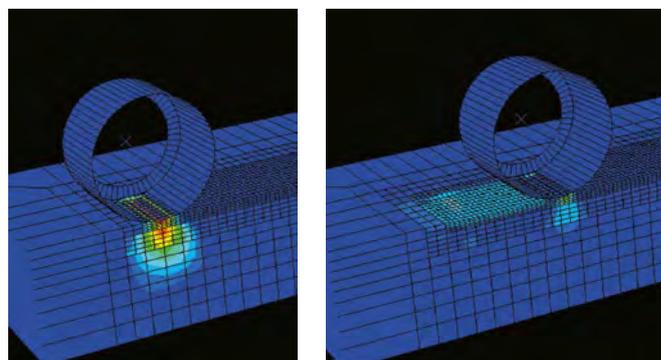
**Parámetros de la máquina**

Es por demás conocido desde el punto de vista de desarrollo y experiencia en campo, que la tecnología de medición integrada en máquinas compactadoras es sensible a ciertos parámetros de operación. Entender lo que el sistema está midiendo hace más fácil ver cómo el uso incorrecto de algunos de estos factores puede producir información/resultado erróneos.

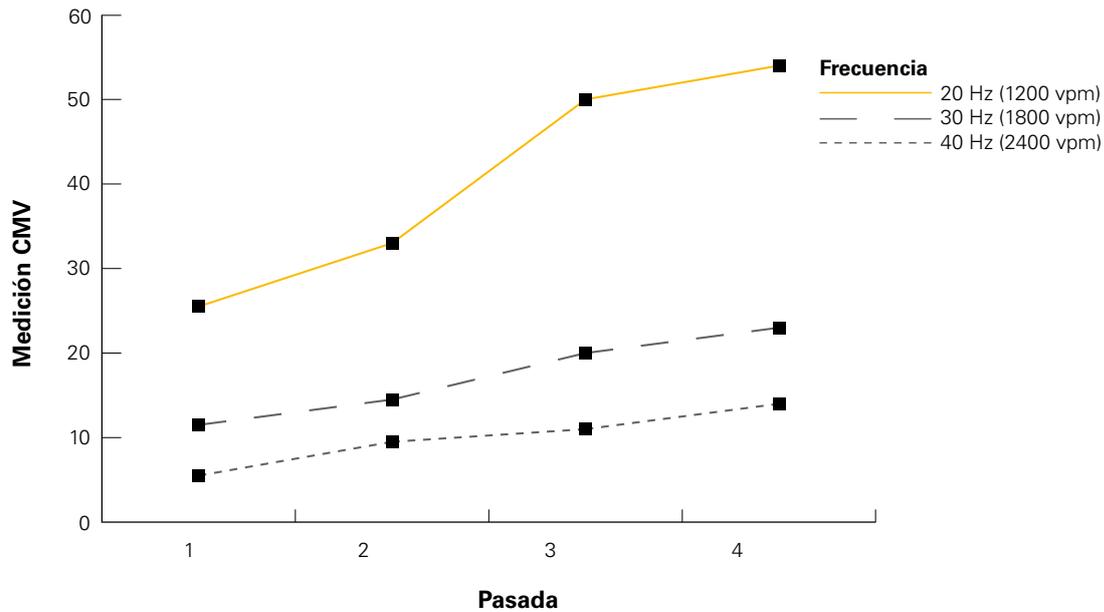
**1. Amplitud** – Si la amplitud del tambor es alta, el efecto de la vibración del tambor se transmitirá a una distancia más profunda. Esta profundidad cambia la medición de compactación del sistema integrado debido a que la cantidad del suelo que se mide es mayor. La probabilidad también se ve incrementada ya que la estructura y tipo de suelo es diferente a mayor profundidad.

Se recomienda utilizar una amplitud alta si lo que se busca es información sobre la variabilidad del suelo a mayor profundidad.

Si solamente se desea conocer las capas superiores, se recomienda utilizar baja amplitud. Aún a una amplitud baja, la profundidad de medición del suelo puede ser de un metro o mayor para los resultados CMV.



*La amplitud alta se transmite a mayor profundidad.*



**2. Frecuencia** – El Control de Compactación Cat con CMV utiliza una relación de la frecuencia vibratoria del tambor y una medición de la respuesta a la frecuencia que regresa al tambor a dos veces la frecuencia del tambor para calcular el valor de compactación (CMV). Cualquier cambio en el ajuste de la frecuencia vibratoria de la unidad compactadora provocará cambios en las mediciones, aún y cuando la rigidez del suelo sea la misma. Esto se debe a que en un suelo con cierta rigidez, las mediciones del CMV tenderán a ser altas si se mide a frecuencia baja y serán bajas si se mide a frecuencia alta. La explicación de esto es compleja y está asociada a la relación de la frecuencia natural del suelo respecto de la frecuencia del tambor vibratorio.

La gráfica muestra cómo el cambio de frecuencia afecta la medición CMV. Si todos los demás parámetros de la máquina y el suelo son los mismos (p.ej. velocidad de operación, amplitud, tipo de suelo, etc.) habrá una gran diferencia entre los CMV medidos por cada ajuste de frecuencia. La frecuencia que se utilice afectará la medición CMV, independientemente de la rigidez del suelo.

**3. Velocidad de operación** – Los resultados que arroje el sistema de medición de compactación integrado en la unidad de compactación se ven afectados por la velocidad de operación hasta cierto punto. Generalmente, las velocidades bajas permiten que el tambor vibratorio tenga más contacto con el suelo, provocando una rigidez más rápida y a mayor profundidad y resultando en menor número de pasadas y tiempo de operación total para

lograr los requerimientos de compactación. Los datos sugieren que las velocidades altas generalmente disminuyen los resultados CMV, pero también incrementan los resultados MDP. Es difícil cuantificar con precisión qué tanto, porque las variaciones en el tipo de suelo, contenido de agua y otros factores pueden nublar el problema durante la prueba.

Cuando se requieren de varias pasadas para lograr el nivel de compactación final (indicado por la rigidez del suelo), el método más eficiente es utilizar una velocidad de operación baja y dejar que el vibrador haga lo suyo. La velocidad baja permite que el tambor vibratorio entre en contacto con mayor espacio y de más golpes por distancia recorrida – y con menores pasadas – resultando en menor tiempo de operación total para lograr los requerimientos de compactación.

También está el rendimiento de combustible: dos pasadas de velocidad baja consumirán menos combustible que seis pasadas con velocidad alta. La regla de oro es: recorrer a baja velocidad para compactar rápidamente y maximizar eficiencia, pero no demasiado lento para que no se presente el desacoplamiento o descompactación. Con la tecnología integrada en la unidad para medir la compactación se recomienda mantener una velocidad consistente y adecuada de aproximadamente 1-2.5 km/h (0.62-1.5 mph) sobre en rocas y arcilla y 2-5 km/h (1.2-3.1 mph) en arena y grava. El Control Automático de Velocidad en las unidades CAT de la serie B puede servir de ayuda en cuanto a este factor.

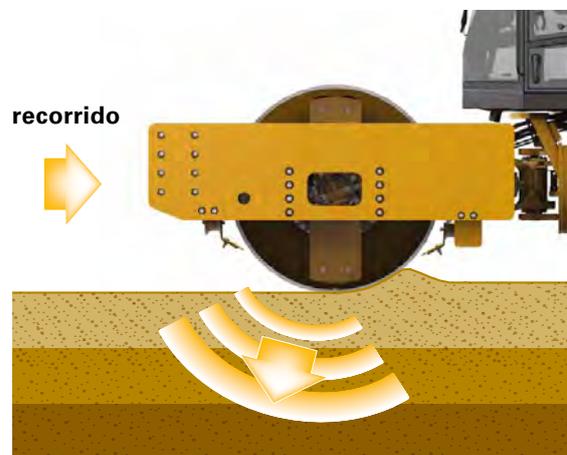
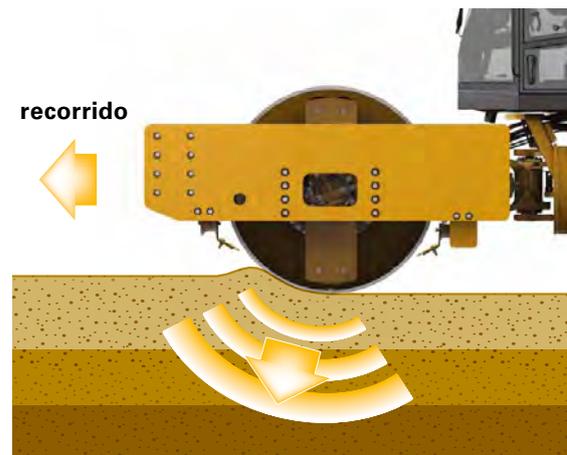
**4. Dirección del recorrido** – La dirección del recorrido, en reversa o hacia adelante, afecta el valor de los datos de medición que el sistema integrado en las unidades registra para cierta rigidez de suelo. Las mediciones de los recorridos hacia atrás o adelante normalmente varían entre el 5 y 20 por ciento y la variación es mayor en suelos extremadamente blandos.

Los resultados de las mediciones de compactación efectuadas por el sistema integrado en la unidad compactadora diferirán dependiendo de la dirección del recorrido debido a que la rotación del peso excéntrico dentro del tambor agrega o le resta torsión neta aplicada al tambor conforme se desplaza sobre el suelo (también debido al balance del peso, las llantas adelante/atrás del tambor y otros factores). Esta torsión influye en la dirección de la vibración efectiva en el suelo y hará que el tambor detecte más hacia el área ya compactada o hacia el área más blanda aún por compactar.

**5. Estado vibratorio** – Un sistema vibratorio activo también puede afectar los valores arrojados por el sistema de medición integrado. Dependiendo del material, el impacto puede o no ser considerable. En cuanto a los datos de pruebas, las tecnologías que permiten medir con el sistema vibratorio apagado producen resultados más confiables porque hay menos variables que afectan la medición. Las tecnologías de energía como el MDP le permiten hacer esto.

**6. Desacoplamiento o doble impacto** – Cuando la rigidez del suelo aumenta, su frecuencia de resonancia o natural estará muy próxima a igualar la frecuencia vibratoria del tambor. Cuando esto sucede, el tambor comenzará a rebotar completamente sobre la superficie a la mitad de la frecuencia vibratoria del tambor y la RMV (Valor de Medición de la Resonancia) incrementará. El RMV simplemente mide qué tanto se está desacoplando el tambor. A mayor desacoplamiento de la máquina, menor confiabilidad de la medición CMV.

**DIRECCIÓN DEL RECORRIDO**



*Cuando la dirección del momento excéntrico iguala la dirección del recorrido de la máquina (ilustración superior), la torsión neta aplicada al tambor hace que el acelerómetro detecte el suelo desde cierto ángulo. Cuando la dirección del momento excéntrico no iguala la dirección del recorrido de la máquina (ilustración inferior), las fuerzas de torsión cambian, cambiando el ángulo de medición. Esto constantemente dará diferentes lecturas CMV en desplazamiento hacia adelante y atrás.*

### [ PROCEDIMIENTO PARA MEDIR LA COMPACTACIÓN MEDIANTE EL SISTEMA INTEGRADO EN LA UNIDAD COMPACTADORA ]

Los compactadores equipados con esta tecnología tienen la capacidad de medir factores que les proporcione a los operadores indicaciones sobre la rigidez del suelo en tiempo real. Hay muchas variables que intervienen en la eficacia de este método y que afectan directamente las mediciones. Es por esta razón que las mediciones regularmente se verifican mediante el uso de uno de los métodos relacionados anteriormente u otros equipos portátiles de prueba. Conforme los sistemas avanzan, se tiene un mejor conocimiento de su uso y los resultados son más aceptados.

El sistema para medir la compactación normalmente consta de dos modos de operación: modo de producción y modo de comprobación.

**Modo de producción** – El modo de producción se utiliza durante el proceso inicial de la compactación. Su objetivo es compactar todo el suelo que se pueda, a un nivel aceptable y de lo más rápida y eficientemente posible. En el modo de producción, esta tecnología le proporciona al operador indicaciones en tiempo real sobre la rigidez del suelo e identifica las áreas de compactación pobre que requieren de acción inmediata para obtener una densidad conforme a la especificada.

En modo de producción, la máquina normalmente se ajusta en amplitud alta y el suelo solo se compacta hasta alcanzar el valor nominal que se pretende. El operador vigila la pantalla para ver las áreas con compactación adecuada. El objetivo principal es cumplir con el trabajo de manera eficiente, compactando tanto como sea posible mientras no se sobre compacten las áreas que están lo suficientemente rígidas.

Debido a que la máquina opera en amplitud alta, se pueden presentar áreas de desacoplamiento. Por todas estas variables – velocidad de operación, dirección, desacoplamiento y variación de humedad en el suelo – los valores del sistema integrado de compactación que se producen en este modo normalmente varían respecto de los valores que se pretenden alcanzar. Estos valores se consideran “primeras mediciones editadas” y la falta de datos exactos o menos variables en estas áreas no es importante en este momento.

**Modo de comprobación** – Una vez que se ha terminado de usar en modo de producción, se ajusta el sistema integrado de medición en modo de comprobación para utilizarse como “rodado de comprobación” y verificar la calidad del trabajo. Normalmente este modo es más preciso que el modo de producción. Aquí se controlan muchas variables, incluyendo la velocidad y dirección del recorrido. Esto asegura que las variables no afecten las mediciones.

El modo de comprobación se utiliza cuando la autoridad contratante solicita datos tomados en situ que den indicaciones exactas sobre la rigidez del suelo de una fase o área de construcción en particular. Este procedimiento podrá realizarse en intervalos periódicos de la construcción cuando sea conveniente operar el compactador de manera controlada en una fase terminada del proyecto.

Para lograr resultados exactos, el operador necesitará mantener todas las variables lo más constante posible. Esto se puede considerar como la fase de precisión de la compactación del suelo.



## **PROCESO RECOMENDADO PARA LA COMPROBACIÓN**

1. Delimitar la sección de la obra que se va a probar y planear un patrón de rodamiento que le permita al operador desplazarse hacia adelante durante toda la operación de prueba.
2. Determinar la velocidad que se pretende alcanzar (entre 2.5-4 km/h (1.5-2.5 mph)) y que se pueda mantener. A menor velocidad, mejor. El uso del control automático de velocidad optimizará una velocidad uniforme que facilite mejor integración de datos y compactación.
3. Ajustar la amplitud en bajo. Esto reducirá la posibilidad de que el tambor se desacople y evitará que la medición penetre a mayor profundidad. Esto facilita la correlación con otros métodos de pruebas.
4. Activar la vibración (o rodamiento estático con MDP) e iniciar el recorrido hacia adelante para iniciar las mediciones de compactación a velocidad, amplitud y frecuencia constantes.
5. Las pasadas del tambor solo deberán tocar o apenas traslaparse; traslape en los extremos o áreas de donde se gira. *Nota: las áreas traslapadas pueden considerarse como pasadas múltiples y pueden arrojar discrepancias en los datos.*
6. La integración manual de datos puede ser engorroso y necesitará que se le relacione con la posición en la obra dentro de las secciones delimitadas con la mayor exactitud posible. La mayoría de los sistemas integrados en las máquinas para medir la compactación no permiten el almacenamiento automático de datos sin la opción GNSS (GPS).
 

Utilice una hoja de cálculo, como Excel, por ejemplo, para ordenar los datos por dirección recorrida. Utilice solamente los datos del desplazamiento hacia adelante para su análisis. Físicamente marque cualquier ubicación que se considere lo suficientemente importante para revisar o realizar pruebas utilizando un método de medición conocido para después hacer la correlación.
7. Cuadricular toda el área que se midió y compactó para medir el contenido de humedad en el suelo. El tamaño de la cuadrícula podrá ajustarse según la escala de la obra y los requerimientos de la agencia contratante. Esto proporcionará información adicional para el análisis de los valores de compactación y permitirá desarrollar un mapa isobárico del contenido de humedad. Las muestras de suelo para medir la humedad deberán tomarse inmediatamente después de que la unidad compactadora haya terminado con un área.
8. Revisar los datos que se registraron de forma manual y seleccionar aquellas áreas que desea correlacionar con las medidas de compactación de algún otro aparato. Seleccione las áreas que den valores altos, bajos e intermedios; seleccione varias áreas de cada una.
9. Correlacionar pruebas de las ubicaciones marcadas. No aproxime ya que las condiciones del suelo pueden variar grandemente a tan poca distancia.

**NOTA:** Para aprovechar al máximo las capacidades de la tecnología integrada, se necesitará que el mapeo por GNSS (GPS) registre todos los datos de la obra con posicionamiento correspondiente detallado. Consulte la sección "Compactación Inteligente" más adelante para obtener información detallada.

**Resumen del sistema de medición de la compactación integrada en unidades compactadoras** – La calidad y los costos son elementos principales en todo proyecto de compactación. Alcanzar las compactaciones esperadas de manera eficiente y efectiva es de vital importancia. Existen demasiadas especificaciones y métodos para medir la compactación. Los métodos de los sistemas de medición de la compactación integrados en los compactadores ofrecen mejores herramientas a los operadores y garantizan la máxima calidad al menor costo posible.

La medición integrada es una tecnología maravillosa cuando se utiliza adecuadamente, pero tiene sus limitaciones en cuanto a lo que ofrece: no puede indicar el tipo de suelo sobre el cual se opera ni tampoco describe el contenido de humedad o características físicas.

Esta tecnología mide la respuesta del suelo y proporciona una fotografía de sus capacidades de resistencia a la carga. Cuando se ajusta y opera de manera adecuada, el compactador vibratorio proporciona información que el operador no podría obtener de otra manera. Esta información le facilita al operador capacitado deducir la condición del suelo. Los datos son una indicación de la rigidez del suelo, más no una garantía ya que existen demasiadas variables. Sin embargo, un operador capacitado entenderá lo que las mediciones indican y las acciones que se deberán ejecutar a partir de estas. Los procesos utilizados son regularmente más importantes que la tecnología en sí.





## Unidad 5

# COMPACTACIÓN INTELIGENTE

La compactación inteligente es el más reciente adelanto en aplicaciones para compactadores vibratorios. La capacidad para medir con precisión la compactación, correlacionar las mediciones con las coordenadas GNSS, verlas en un mapa del sitio dentro de la cabina del operador y registrar y almacenar datos para su documentación, era hasta ahora inimaginable. Solo el tiempo nos dirá qué innovaciones tecnológicas vendrán después. Caterpillar estará al frente en esa discusión y los descubrimientos que de ahí resulten.



## [ ¿QUÉ ES COMPACTACIÓN INTELIGENTE? ]

Actualmente la compactación inteligente es un término que se aplica a los sistemas de medición de compactación incorporados en compactadores vibratorios. Las definiciones de compactación inteligente varían entre las diferentes agencias gubernamentales y fabricantes de equipo. En general, la compactación inteligente puede definirse como una tecnología integrada al compactador aplicada al proceso de compactación para mejorar rendimientos en la obra mediante la eliminación de especulaciones. La tecnología proporciona información a los operadores en tiempo real con el objeto de ayudarles a determinar la evolución y/o conclusión de la compactación.

Con base en esta definición se puede decir con seguridad que la tecnología integrada en unidades compactadoras es de hecho una forma de compactación inteligente. Estos sistemas proporcionan detalles acerca de los esfuerzos de compactación en obra en tiempo real, permitiéndoles tanto a los operadores como a los superintendentes de obra contar con información que anteriormente no tenían.

Existen otros sistemas sofisticados que pueden también mapear los datos para proporcionar una perspectiva visual del trabajo terminado y que los almacenan para su análisis posterior.

Por ejemplo, el Departamento de Transporte (EUA) en una de las especificaciones disponía lo siguiente:

### **Compactación inteligente (IC, por sus siglas en inglés)**

Este proceso implica medir y **registrar el tiempo, ubicación y parámetros de compactación** del tratamiento granular durante el proceso de compactación mediante un tambor vibratorio equipado con un sistema

de medición con base en acelerómetros y un sistema de posicionamiento global.

Ahora, este Departamento ofrece una definición o requerimiento separada para compactador inteligente:

### **Unidad compactadora inteligente (IC)**

Los compactadores deberán estar equipados con tambores vibratorios y un sistema de medición con base en acelerómetros **capaz de registrar mediciones de los parámetros de la compactación.**

Al mismo tiempo, la Administración Federal de Autopistas de los EUA (FHWA) describe la compactación inteligente como:

**Compactación inteligente (IC)** se refiere a la compactación de materiales utilizados en carreteras, tales como suelos, agregados o asfalto, mediante compactadores vibratorios modernos equipados con un sistema de medición integrado, **sistema computarizado de reporte integrado, sistema de posicionamiento global (GPS) basado en mapas** y control de retroalimentación opcional. Los compactadores IC facilitan el monitoreo de la compactación en tiempo real y el ajuste oportuno del proceso de compactación mediante la integración de mediciones, **documentación** y sistemas de control. Estos compactadores también llevan un registro continuo de planos codificados por colores que les permite a los usuarios visualizar la ubicación precisa del compactador, el número de pasadas y mediciones de la rigidez del material.

La Unión Europea también ha creado un medio para definir el uso de la compactación inteligente. En su panfleto, "Directrices para evaluar compactadores de suelo y asfalto equipados con control de compactación continua (CCC)" el Comité Europeo de Equipo de Construcción (CECE) ha creado una matriz para clasificar equipo con tecnologías de control continuo de compactación (Consultar el Apéndice).



Cabe mencionar que en definiciones más recientes de compactación inteligente claramente se están puntualizando no solamente las capacidades de la medición integrada y visualización de datos en tiempo real, sino también la capacidad para registrar datos de posicionamiento y almacenarlos para su documentación, análisis posterior y retención de registros. Por lo tanto, la definición de compactación inteligente continuamente evoluciona.

Caterpillar sabe que un compactador inteligente debe medir la compactación, correlacionar mediciones con las coordenadas GNSS, mostrar un mapa con las mediciones, registrar datos y documentar los resultados. Estas capacidades proporcionan muchas ventajas en términos de tiempo y costo para los operadores, contratistas y dueños de proyectos. Por lo tanto, la definición por Caterpillar es la siguiente:

#### **Compactación inteligente (IC)**

**Un sistema que mide la compactación del suelo, muestra medidas al operador, registra y mapea los resultados de la compactación mediante un sistema de mapeo GNSS y controla o guía los esfuerzos de compactación de la máquina en respuesta al sistema de medición.**

Esta definición aplica tanto para los compactadores vibratorios como los no vibratorios y no requiere de un sistema de medición con base en acelerómetros. Como se describió anteriormente, el MDP es una tecnología nueva y ofrece muchas ventajas por encima de la tecnología con base en acelerómetros, dependiendo de la aplicación

Esta guía solamente hará referencia a la compactación inteligente en los casos donde el compactador esté equipado con capacidades de medición integrada (CMV o MDP), de mapeo y registro y almacenamiento de datos para la documentación y análisis posterior.

#### **Posicionamiento del compactador en la obra**

La tecnología de medición de compactación integrada a la máquina puede ser ampliada con la tecnología de los Sistemas Satelitales de Navegación (GNSS) los cuales facilitan el posicionamiento exacto en la obra a través de diferentes constelaciones de satélites. La tecnología del GNSS está totalmente disponible y ofrece diferentes niveles de exactitud; algunos requiriendo infraestructura periférica proporcionando datos para corregir el posicionamiento.



Con este nivel de datos y detalles, se pueden asociar las mediciones mediante esta tecnología con la ubicación física en la obra y ser configuradas para mapear estos valores, incluyendo el número de pasadas, dirección de desplazamiento de la máquina y muchas otras configuraciones.

Independientemente de la tecnología de medición de la compactación que se utilice en las unidades compactadoras, el sistema proporciona mediciones en tiempo real del suelo que se está compactando en cualquier momento dado. La integración de la funcionalidad de mapeo y capacidad para registrar y trazar mediciones de la ubicación exacta en un mapa, hacen que la información sea mucho más útil.

#### *¿Cómo funcionan los datos del posicionamiento?*

Los sistemas de mapeo utilizan el Sistema Satelital de Navegación Global (GNSS) para obtener datos de cada medición que se registra. Esto incluye el GPS (operado por el Departamento de Defensa de los E.U.A.) y GLONASS (operado por el gobierno ruso) así como también otros sistemas que están por lanzarse, incluyendo Galileo en la Unión Europea y Compass en China.

## COMPACTACIÓN

La ubicación se traza por triangulación con las ubicaciones conocidas de satélites desde estos sistemas. Los sistemas satelitales no son lo suficientemente exactos y requieren un grado de corrección. Los sistemas de mapeo en los compactadores de suelo utilizan sistemas de precisión de mediciones para corregir las señales de los satélites y proporcionar un grado de exactitud útil. Existen dos sistemas disponibles: SBAS y RTK.

La mayoría de los sistemas utilizan SBAS, o sistema de aumento de precisión basado en satélites, para corregir las señales de posicionamiento de los satélites. SBAS triangula varios sitios terrestres para proporcionar "puntos de anclaje" conocidos desde donde se corrigen las mediciones. Los sistemas SBAS regularmente son exactos (hasta 1 m (3 ft.)) y no requieren infraestructura periférica.

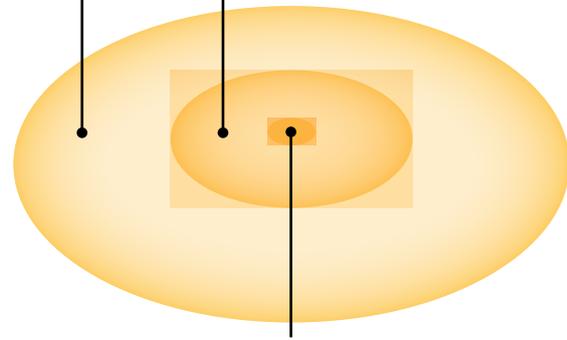
Por otro lado, hay muchos fabricantes que aumentan la precisión de las señales mediante el RTK, o levantamiento cinemático en tiempo real. Esta tecnología requiere el uso de estaciones locales de radio para la corrección de datos.

De hecho, la tecnología reciente también utiliza el RTK para módems y celulares, inclusive VRS (estaciones de referencia virtual)- pero esto implica tener una organización y soporte de expertos en tecnologías de la información. Las estaciones son caras y la tecnología requiere tener línea de visión desde el receptor en el compactador hasta la estación o unidad móvil. Sin embargo, el RTK es más exacto que SBAS, hasta en centímetros (pulgadas). También le permite al sistema registrar datos de elevaciones que le permitirían al compactador mapear rasantes

## PRECISIÓN DE SISTEMAS SATELITALES

**Autónomo: 10 m (30 ft)**  
sin corrección

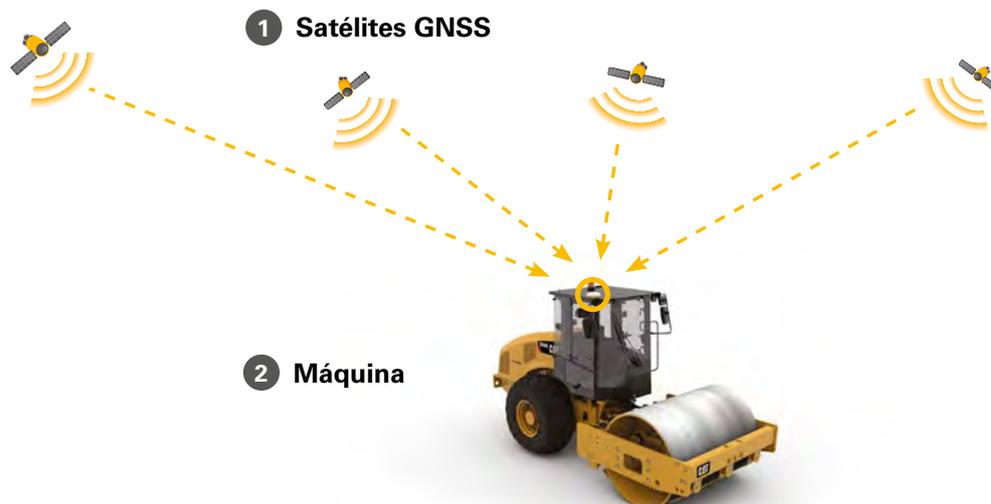
**SBAS: 1-2 m (3-5 ft)**



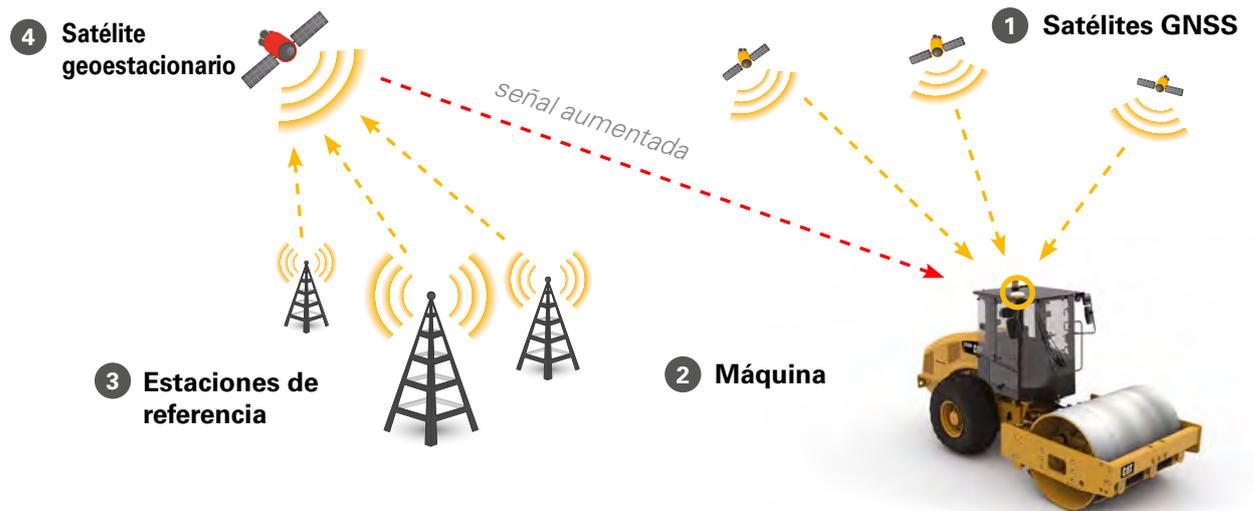
**RTK: 1 cm (0.4 in) horizontal,  
2 cm (0.8 in) vertical**  
(con estación local o VRS)

Esto proporciona una ventaja importante, debido a que el compactador es regularmente la última máquina que se utiliza en las obras, y se puede ahorrar en costo y tiempo durante las actividades topográficas finales.

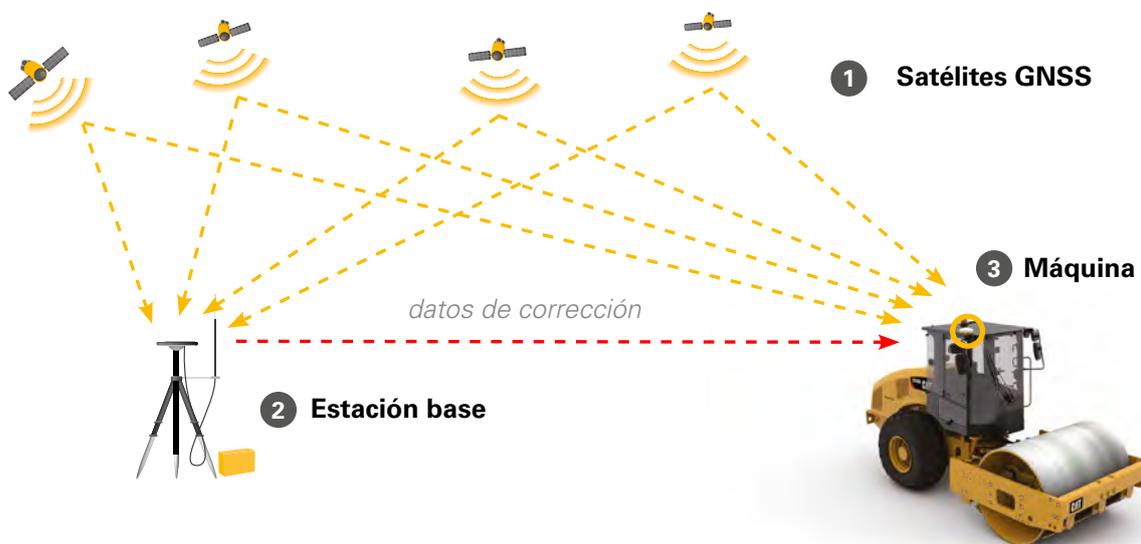
## AUTÓNOMO



**SBAS (SISTEMA DE AUMENTO DE PRECISIÓN BASADO EN SATÉLITES)**



**RTK (LEVANTAMIENTO CINEMÁTICO EN TIEMPO REAL)**



**Las ventajas de utilizar datos de posicionamiento**

El sistema integrado de medición en sí puede revelar muchas cosas sobre las condiciones de la compactación en tiempo real; pero esta información es muy específica y muestra una fotografía momentánea a la vez. Los datos de posicionamiento no solo le permiten al sistema dar una medición conforme se tomó, sino TODAS las mediciones en el contexto de dónde se tomaron. Esto cambia la visión de momentánea a incluyente y le abre las puertas al análisis exhaustivo. El operador y superintendente de obra tendrán una imagen de la calidad de compactación de todo el sitio en lugar de solo una fotografía a la vez.

Esta capacidad es lo que distingue a los sistemas IC en comparación con los demás métodos de pruebas. Regularmente el personal de la obra realiza pruebas de calidad mediante aparatos

de prueba portátiles y en pocas ubicaciones seleccionadas. Este proceso lleva mucho tiempo y es caro. Los resultados de las pruebas se utilizan para representar la mayor parte del área respecto de lo que en realidad se probó; regularmente en una relación de 1:1 millón, lo cual no es bastante alentador. La IC puede medir absolutamente toda el área en el momento en que se está compactando.

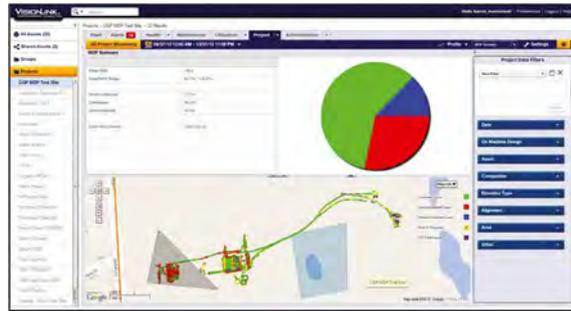
Además, algunos sistemas tienen la capacidad de importar diseños de ingeniería o arquitectura en 3D en la pantalla. Esto puede ser de provecho en una obra donde se utiliza el control de rasante sin estacas o donde no se dispone de estacas de rasante u otros marcadores.

## El uso de datos registrados

Es fácil ver las ventajas que los datos adicionales ofrecen al operador, facilitando una manera más eficiente y efectiva en cuanto a costos para lograr una compactación con calidad en la obra. Muchos inspectores y administradores de carreteras requieren reportes básicos en tiempo real e in situ; es decir, datos de texto documentando la evolución de la compactación impresos mediante una impresora portátil. Pero muchas autoridades ahora están solicitando reportes más detallados y enviados a ubicaciones fuera de la obra. Esto significa la transmisión de todos los datos de compactación registrados por la máquina en la obra a una PC en una oficina. Los datos pueden transferirse de manera manual a través de un USB (unidad de almacenamiento) o comunicación inalámbrica mediante hardware y software.

Una vez que se recibieron todos los datos en la computadora de la oficina, los usuarios se dan a la tarea de filtrarlos y ordenarlos para construir los reportes solicitados por los inspectores y autoridades viales. Existen muchos programas disponibles hoy en día que facilitan esta tarea entre los cuales se encuentran AccuGrade Office, SiteVision Office, VisionLink, Veda y muchos más. Estos programas varían en cuanto a tipo de formato, capacidad y precio.

## INTERFAZ VISIONLINK



## [ VENTAJAS DE LA COMPACTACIÓN INTELIGENTE ]

**Documentos de control y aseguramiento de calidad** – La compactación inteligente permite documentar el trabajo finalizado. Facilita el control durante la compactación con capacidad de vigilar su evolución diaria o en tiempo real así como también almacenar y analizar datos electrónicos que puedan correlacionarse con registros a largo plazo o históricos de los datos de la obra.

**Incremento en la productividad del operador** – El operador puede visualizar los resultados que le ayudan a determinar si el suelo ha llegado a la rigidez que se pretende alcanzar. Los datos en tiempo real le permiten actuar de inmediato. Por ejemplo, el sistema le puede alertar de áreas blandas, indicar problemas potenciales por contenido de humedad y, con exactitud del RTK, también puede revisar los rasantes y elevaciones finales.

**Obras más eficientes** – Los resultados facilitan un mapa de toda el área compactada el cual puede revelar áreas que necesitan más compactación o que ya llegaron a la compactación esperada. Esto reduce las pasadas y consumo de combustible y puede reducir el número de pruebas de compactación manuales necesarias en la obra, manteniendo la producción en un nivel constante mientras se reducen costos por pruebas con menos muestras que tomar y almacenar.

**Confiabilidad en los resultados –**

El posicionamiento exacto identifica con precisión ubicaciones con problemas de compactación a principios del proceso de construcción, permitiendo la corrección de costos y reducción de retrabajos. Los datos proporcionan una referencia confiable de la calidad total del trabajo en formato visual fácil de entender. Esto permite a los operadores capacitados deducir cuándo el trabajo se ha finalizado, dándoles la confianza de continuar con la siguiente área en lugar de esperar los resultados de una prueba convencional.

**RESULTADOS DE LA MEDICIÓN**



**[ ESPECIFICACIONES ACTUALES DE LA COMPACTACIÓN INTELIGENTE ]**

En general se ha incrementado el uso de la compactación inteligente para aplicaciones de suelo debido a que las agencias gubernamentales han estudiado y aceptado las ventajas de esta tecnología y producido especificaciones para su uso. Las especificaciones garantizan que la tecnología se aplique de tal manera que se produzcan resultados aceptables para la agencia que las especifica.

La Administración Federal de Autopistas de los E.U.A. (FHWA) desarrolló especificaciones genéricas para la compactación inteligente. Los Departamentos Estatales de Transporte (DOT) disponen de ellas para usarlas como están o modificarlas conforme a sus requerimientos. He aquí un ejemplo de las especificaciones tal y como se emitieron:

Los compactadores IC deberán cumplir con los siguientes requerimientos:

1. El compactador IC deberá ser autopropulsado, estar equipado con un solo tambor vibratorio y acelerómetros en su interior o próximos al tambor para medir las interacciones entre el tambor y los materiales compactados y evaluar los esfuerzos de compactación aplicados. El compactador IC deberá ser liso o de pisón.
2. Los resultados que se produzca serán Valores de Medición de la Compactación (IC-MV) y representarán la rigidez de los materiales con base en la vibración del tambor y respuesta de los materiales subyacentes.

3. El radio GPS y unidades receptoras estarán montados sobre el compactador IC para vigilar las ubicaciones del tambor y contar el número de pasadas.
4. El compactador IC deberá incluir un sistema de documentación integrado capaz de mostrar en tiempo real mapas codificados por colores de los valores de medición IC, incluyendo valores de la rigidez, ubicación del tambor, número de pasadas, velocidad, junto con la frecuencia de vibración y amplitud del tambor.
5. Las pantallas deberán tener la capacidad de transferir datos por medio de un puerto para USB.
6. La impresora portátil tendrá la capacidad de imprimir la identificación del compactador, fecha de las mediciones, área de construcción mapeada, porcentaje del área de construcción mapeada, IC-MV que se pretende alcanzar y áreas que cumplieron los valores IC-MV. (Las impresoras serán seleccionadas por cada departamento estatal.)

Las autoridades gubernamentales de otros países han desarrollado sus propias especificaciones con base en sus procesos de construcción de carreteras. A pesar de que varían de las especificaciones FHWA, el objetivo es similar: desean proporcionar un estándar en cuanto al uso del equipo.

# COMPACTACIÓN

Especificaciones	Equipo	Tamaño de la obra	Especificaciones de ubicación	Documentación
<b>Mn/DOT (EUA)</b>	Tambor liso o de pisón vibratorio (25,000 lbs)	100 m x 10 m (base mínima). Grosor máximo de 1.2 m.	Una franja calibración/control por tipo u origen de material rasante	Compactación, rigidez, humedad, actividades de control de calidad y acciones correctivas (reportes semanales)
<b>ISSMGE (Sociedad internacional de mecánica de suelos e ingeniería geotécnica)</b> <a href="http://www.issmge.org/">www.issmge.org/</a>	Compactador elegido por experiencia	100 m x ancho del sitio	Homogénea, superficie nivelada. Traslape $\leq 10\%$ ancho del tambor.	Patrón de rodamiento, secuencia de la compactación y pasadas de medición, amplitud, velocidad, valores dinámicos de medición, frecuencia, impacto y ubicaciones correspondientes
<b>Earthworks (Austria)</b>	Recomienda compactadores de tambor vibratorio con llantas radiales y tambores lisos	100 m de largo x ancho del sitio	Sin irregularidades cerca de la superficie (materiales o contenido de agua). Traslape $\leq 10\%$ ancho del tambor.	Plan del recorrido de la compactación, secuencia de la compactación y medidas del recorrido, velocidad, amplitud frecuencia, velocidad, valores dinámicos de medición, impacto y ubicaciones correspondientes
<b>Research Society for Road and Traffic (Alemania)</b>	Compactadores autopropulsados con llantas radiales; tambores vibratorios remolcados con vehículo remolcador	Cada área de calibración deberá cubrir por lo menos 3 campos parciales ~ 20 m. largo	Nivelada y libre de charcos. Tipo de suelo similar, contenido de agua, grosor de la capa y capacidad de resistencia para soportar cargas. Traslape $\leq 10\%$ ancho de la máquina.	Valor dinámico de medición, frecuencia, velocidad, impacto, amplitud, distancia, tiempo de medición, tipo de compactador, tipo de suelo, contenido de agua, grosor de la capa, fecha, hora, nombre del archivo o número de registro, condiciones climáticas, posición de las pruebas y dirección del rodamiento, altura absoluta o posición de la aplicación, condiciones locales y terraplenes en áreas marginadas, parámetros de la máquina y desviaciones detectadas
<b>Vägverket (Suecia)</b>	Compactador con un solo tambor vibratorio u oscilante. Carga lineal mínima de 15-30 kN.	Grosor de la capa más grande 0.2–0.6 m.	La capa deberá ser homogénea y no congelada. Capas protectoras < 0.5 m pueden compactarse con la sub-base.	—

Especificaciones de la compactación	Velocidad	Frecuencia
90% de las mediciones de compactación y promedio de las mediciones del deflector liviano (con base en 3 pruebas) deberán dar el 90% de los valores que se pretenden alcanzar establecidos en la franja de calibración.	Misma durante la calibración y producción de compactación	
Coeficiente de correlación $\geq 0.7$ . Valor mínimo $\geq 95\%$ de Ev1 y media de $\geq 105\%$ (o $\geq 100\%$ en modo de impacto). Valores dinámicos de medición por debajo del mínimo especificado para $\leq 10\%$ del recorrido. Medición mínima de $\geq 80\%$ del mínimo especificado. Desviación estándar (de la media) de $\leq 20\%$ en una pasada.	Constante 2–6 km/h ( $\pm 0.2$ km/h)	Constante ( $\pm 2$ Hz)
Coeficiente de correlación $\geq 0.7$ . Valor mínimo $\geq 95\%$ de Ev1 y media de $\geq 105\%$ (o $\geq 100\%$ en modo de impacto). Valores dinámicos de medición por debajo del mínimo especificado para $\leq 10\%$ del recorrido. Medición mínima de $\geq 80\%$ del conjunto mínimo. Medición máxima en un recorrido sin exceder conjunto máximo (150% del mínimo determinado). Desviación estándar (de la media) de $\leq 20\%$ en una pasada.	Constante 2–6 km/h ( $\pm 0.2$ km/h)	Constante ( $\pm 2$ Hz)
Coeficiente de correlación de un análisis de regresión de $\geq 0.7$ . Unidades individuales de área (ancho del tambor) con valor dinámico de medición dentro del 10% del área adyacente adecuada para la calibración.	Constante	
Se puede cumplir con la capacidad de resistencia o grado de compactación. Valores de la media de compactación para dos puntos de inspección $\geq 89\%$ para la sub-base debajo de la base y para capas protectoras más del 0.5 m de ancho. Media de $\geq 90\%$ para bases. Media requerida para dos relaciones de capacidad de resistencia varía dependiendo del tipo de capa.		Constante 2.5–4.0 km/h

### [ PROCEDIMIENTOS DE OPERACIÓN DE LA COMPACTACIÓN INTELIGENTE ]

Similar a la tecnología de medición de la compactación integrada en la unidad compactadora descrita anteriormente, el proceso de la compactación inteligente en compactadores vibratorios de suelo es similar, pero con ligeras diferencias debido a las capacidades adicionales de los sistemas avanzados. Existen dos modos de operación: modo de producción y modo de comprobación.

*Modo de producción* – Nuevamente, el objetivo de este modo es compactar todo el suelo que se pueda, a un nivel aceptable y lo más rápido y eficientemente posible tanto en reversa como hacia adelante hasta lograr el valor nominal que se pretende alcanzar. La compactación se realiza bajo parámetros de operación normales – velocidad del recorrido de 1 a 2,5 km/h (0.6-1.6 mph) en rellenos de roca y arcilla; 2-5 km/h (1.2-3.1 mph) en arenas y limos no cohesivos—con amplitud de la máquina regularmente en alta.

Si el compactador está equipado con compactación inteligente, el operador podrá recibir más información en lugar de un simple número sin dimensión indicando la rigidez del suelo o resistencia a la carga. Con la pantalla a colores e integración y almacenamiento de datos, el operador tendrá una fotografía de la compactación en la ubicación exacta del compactador y podrá

monitorear el número de pasadas, porcentaje del valor de medición de la compactación que se pretende, inclusive el porcentaje del cambio en el valor de la compactación que se pretende en cada pasada (tanto en áreas de suficiente compactación como en áreas de pobre compactación). El operador también podrá marcar digitalmente puntos y áreas que requieren corrección para cumplir con las especificaciones de compactación. Todos los datos almacenados podrán transmitirse para su revisión, filtración y análisis.

En este modo, el sistema de mapeo le permite al operador visualizar el avance de la compactación y nivel moderado de aseguramiento de calidad. Sin embargo, debido a todas las variables (velocidad de operación, dirección, desacoplamiento, variación de la humedad en el suelo) los datos de compactación que se producen en este modo aún son de menor calidad que la requerida. Sin embargo, le ofrece datos al operador para maximizar la eficiencia y uniformidad y eliminar especulaciones durante el proceso de compactación

Cuando los valores alcanzan el rango de valores que se pretenden alcanzar, el operador podrá trasladarse a la siguiente área mientras que el personal de calidad realiza pruebas para asegurar que el trabajo cumple con las especificaciones o que el área está lista para el modo de comprobación.



*Modo de comprobación* – Después de haber concluido con los trabajos de compactación, se podrá utilizar el sistema de medición como compactador de comprobación para verificar la calidad del trabajo en este modo de operación más preciso. Este modo tiene la finalidad de ser utilizado cuando la autoridad contratante solicita documentación o un mapa mostrando indicaciones exactas sobre la rigidez del suelo para una fase de la construcción en particular.

Es de suma importancia asegurar que las variables están controladas y que son constantes y que por consiguiente los parámetros de operación ahora son: velocidad constante de recorrido de 3 km/h (2 mph) con la amplitud configurada en baja (o apagado, de ser necesario en caso de una

sobre-compactación u otros problemas con una máquina equipada con MDP). Esto ayuda a verificar que estas variables no influyen las mediciones y datos que se estén integrando y almacenando para efectos de reportes.

En relación con el rodado de comprobación, también cabe mencionar que lo que se está midiendo (el grado de compactación del suelo) cambia conforme se efectúa la medición. Cuando el compactador se desplaza, su peso estático ejerce presión y otras fuerzas sobre el suelo. Es por esta razón que los operadores deberán procurar disminuir la cantidad de fuerza ejercida al tomar mediciones. La capacidad de los sistemas basados en energía para mediciones con tambor estático (sin vibración) los hace ideales para esta aplicación.



## PROCESO DE COMPROBACIÓN RECOMENDADO

1. Planear un patrón de rodamiento que le permita al operador desplazarse hacia adelante durante toda la operación de mapeo.
2. Determinar la velocidad de operación de 2.5 a 4 km/h (1.5 a 2.5 mph) que se pueda mantener. Mientras más lento, mejor. Utilizar el control automático de velocidad para que la velocidad sea uniforme y permita mejor integración de datos de medición y compactación.
3. Configurar la amplitud a baja. Esto reducirá la posibilidad de que rebote el tambor y que se produzca una medición a mayor profundidad. Esto posibilitará la correlación con los otros métodos de pruebas.
4. Seleccionar “encender comprobación” en el menú de la pantalla e iniciar la vibración (o rodado estático con MDP) y avanzar para comenzar a tomar las medidas de compactación a velocidad de operación constante, amplitud y frecuencia.
5. Utilizar el posicionamiento GNSS para guiar la máquina a que solamente haga una pasada sobre el área de interés. Las pasadas del tambor apenas deberán hacer contacto o traslaparse; traslape en los extremos o áreas donde se gira. NOTA: áreas traslapadas pueden ser consideradas como múltiples pasadas y pueden causar discrepancias en los datos registrados.
6. Cuando se ha cubierto toda el área, seleccionar “apagar comprobación” en la pantalla.
7. Cuadricular toda el área que se midió y compactó para medir el contenido de humedad en el suelo. El tamaño de la cuadrícula podrá ajustarse según la escala de la obra y los requerimientos de la agencia contratante. Esto proporcionará información adicional para el análisis de los valores de compactación y permitirá desarrollar un mapa isobárico del contenido de humedad. Las muestras de suelo para medir la humedad deberán tomarse inmediatamente después de que la unidad compactadora haya terminado con un área.
8. Revisar el mapa y datos de la compactación para seleccionar aquellas áreas que se desean correlacionar con los valores producidos por algún otro aparato de medición. Seleccionar las áreas que den valores altos, bajos e intermedios. Seleccionar varias áreas de cada una.
9. Efectuar pruebas de correlación utilizando un GNSS portátil para ubicar las áreas de prueba seleccionadas con mayor exactitud. No aproximar ya que las condiciones del suelo pueden variar bastante a tan corta distancia (consultar la siguiente sección que trata del equipo de pruebas para la correlación).

## [ MÉTODOS PARA CALIBRAR EL VALOR CMV O MDP ]

Existen varios métodos para calibrar el valor de la compactación que se pretende alcanzar (CMV o MDP) y el número de pasadas que se requieren. Algunos de estos métodos los dictará la agencia contratante y podrán diferir de lo que esta guía indica.

Las prácticas industriales tienden más a que el área se compacte uniformemente a un nivel aceptable y menos en intentar obtener un valor de compactación o densidad específico para todas las áreas de la obra.

### Calibración del sitio utilizando una franja de pruebas y un aparato de pruebas independiente

Este método tiene el propósito de eliminar todas las posibles variables del proceso de medición y utilizar los mismos suelos y métodos conforme se utilicen durante la construcción de la carretera o edificación. Este método requiere mucho tiempo y recursos, pero es la mejor manera de entender el proceso y construir una línea base para entender las tecnologías que participan.

1. Localizar un área de pruebas que pueda dejarse intacta mientras dure la obra y cuyo suelo, rasante y estructura del subsuelo sea similar a la mayoría de las áreas en la obra.
2. Excavar/llenar el área de pruebas a gradar y nivelar para crear la sub-base para la franja de pruebas.
3. Crear un mapa de compactación con la ayuda de un compactador de suelos vibratorio y el sistema de compactación inteligente en modo de comprobación, amplitud baja, frecuencia constante (o con vibración en apagado, en caso de MDP) y velocidad constante de 3 km/h (2 mph) hacia adelante.
4. Si el mapa de compactación muestra una variabilidad alta (el 90 por ciento de los valores deberán estar dentro del 20 por ciento de variación del valor promedio), compactar la base en amplitud alta para tratar de igualar los valores de compactación de las áreas blandas con los valores de las áreas con mayor compactación. Repetir el paso #3.
5. Si la sub-base ahora se encuentra uniformemente compactada (cumpliendo con la prueba: 90 por ciento de los valores dentro del 20 por ciento de variación del valor promedio) continúe con el paso #6, de lo contrario deberá

seleccionar otra franja de pruebas (paso #1) o realizar trabajos de corrección en la sub-base para obtener un mapa más uniforme. Los trabajos de corrección pueden implicar la excavación de objetos enterrados, tales como piedras y bolas de arcilla o estabilización del suelo con cal u otros agentes. Si se utiliza agente estabilizador en la franja de pruebas, también se deberá utilizar en toda la obra para que la franja de pruebas tenga validez.

6. Medir la compactación de la sub-base mediante la prueba de la placa de carga portátil o deflectómetro liviano utilizando un patrón uniforme de puntos de prueba en toda el área de la franja de pruebas. Evite utilizar aparatos de densidad nuclear o penetrómetros de cono ya que miden diferentes características de suelo (densidad) que el compactador vibratorio (rigidez). Necesitará ubicar estos puntos de prueba por medio de un aparato GNSS con capacidad de precisión en decímetros para poder hacer la correlación correcta con el mapa de compactación GNSS que se obtiene del compactador inteligente. Para realizar pruebas en patrón de cuadrícula, utilice el mapa GNSS y seleccione varias ubicaciones dispersas que representen valores de compactación altos, bajos y medianos. Realice por lo menos tres pruebas por cada rango de valor (9 puntos de prueba como mínimo). Mientras más puntos de prueba se utilicen, mayor será la precisión estadística del resultado.
7. Medir el contenido de humedad en cada punto de prueba. Si el contenido muestra gran variación, las correlaciones no producirán resultados uniformes.

**Nota de precaución:** Recuerde que el aparato de pruebas portátil utilizado para calibrar el valor de la medición de compactación integrado en el compactador tiene su propia variabilidad. Esto significa que se puede utilizar para medir el mismo suelo con las mismas propiedades varias veces y no proporcionar exactamente los mismos resultados. Por ejemplo, el densímetro nuclear puede variar en un 15 por ciento para la misma muestra. En la práctica actual se toma una lectura, se rota el aparato 90 grados y se toma otra lectura. El promedio de esas dos lecturas se registra como valor medido.

## COMPACTACIÓN

8. Correlacionar los valores de la prueba de compactación con aquellos producidos por el mapa GNSS y graficar los resultados con los valores de compactación en el eje "y" y los resultados de la prueba portátil en campo con el eje "x". A esto se le llama "grafica de dispersión".
9. Utilizar la metodología de la curva para determinar la mejor curva de calibración entre los valores de la medición integrada y el método de la prueba de campo. Esta es la herramienta que se utilizará solamente para ese tipo de suelo en la obra y pruebas de la compactación de la sub-base.
10. Colocar el material de relleno de la primera capa uniformemente a la profundidad especificada.
11. Compactar el material hasta que quede uniformemente compactado y los valores de la medición integrada no cambien demasiado al desplazarse hacia adelante.
12. Repetir del paso #2 al #9 para esta capa de material. Esta capa base tendrá su propia curva de calibración que se utilizará en toda la obra para esta capa de material.
13. Repetir los pasos #10 al #12 para todas las capas de relleno que se coloquen. Cada capa tendrá su propia curva de calibración.
14. Si las condiciones del suelo cambian debido al clima, vuelva a realizar pruebas de comprobación en la franja de pruebas para restablecer el nivel de aceptación para el valor de la medición integrada.



### Calibración de los resultados de la medición integrada y número de pasadas utilizando un compactador de suelos (sin aparato de pruebas de campo independiente)

Algunos países escandinavos utilizan este proceso o uno similar. Es más pragmático y requiere menor tiempo y recursos mientras proporciona un medio de control de compactación adecuado sin utilizar otras mediciones de compactación como estándar. El objetivo es utilizar el compactador para establecer un nivel máximo nominal de la compactación para los materiales de la obra y determinar el número de pasadas para alcanzar ese nivel. El propósito es crear un nivel de compactación uniforme en toda la obra. El siguiente proceso utiliza una franja de pruebas para establecer líneas base de la compactación. La franja de pruebas es opcional, conforme se pueda compactar una porción de la obra o la totalidad de la obra como si fuera una franja de pruebas.

1. Localizar un área de pruebas que pueda dejarse intacta mientras dure la obra y cuyo suelo, rasante y estructura del subsuelo sea similar a la mayoría de las áreas en la obra.
2. Excavar/llenar el área de pruebas a gradar y nivelar para crear la sub-base para la franja de pruebas.
3. Crear un mapa de compactación de línea base (mapa de comprobación) con la ayuda un compactador de suelos vibratorio y el sistema de compactación inteligente en modo de comprobación, amplitud baja, frecuencia constante (o con vibración en apagado en el caso de MDP) y velocidad constante de 3 km/h (2 mph) en dirección hacia adelante.
4. Revisar el contenido de humedad en el suelo en varias ubicaciones de la franja de pruebas. Si es demasiado alta o baja, corregir antes de realizar cualquier compactación adicional.
5. Si el mapa de compactación muestra una variabilidad alta (90 por ciento de los valores deben estar dentro del 20 por ciento de variación del valor promedio) compactar la base en amplitud alta hasta que los valores de compactación sean más consistentes en toda la franja de pruebas. Repetir el paso #3.
6. Después de alcanzar una compactación uniforme, revisar el contenido de humedad en varias ubicaciones y registrar los resultados.
7. Colocar el material de relleno de la primera capa. Seleccionar la configuración de mapa de comprobación y compactar utilizando amplitud alta a una velocidad de operación uniforme de 3 km/h (2 mph). Completar una pasada hacia adelante y hacia atrás por cada carril antes de continuar con el otro para compactar el material. El contenido de humedad deberá ser uniforme y óptimo según el relleno de suelo o piedra que se esté utilizando.
8. Repetir el ciclo de compactación en toda el área, verificando el nivel del valor de compactación que más predomine en cada pasada.



9. Repetir el paso #8 hasta que el nivel de compactación entre cada pasada no cambie considerablemente o que el compactador comience a rebotar.
10. El valor promedio en que la medición de la compactación comienza a desnivelarse es el valor objetivo y el número de pasadas que le tomó para alcanzar este nivel de compactación es el número de pasadas objetivo.
11. Registrar resultados y establecer el valor y número de pasadas objetivos conforme a esta capa.
12. Repetir los pasos #7 al #11 con un mapa de comprobación nuevo por cada capa nueva. Al terminar se tendrá un valor de compactación y número de pasadas objetivo por cada capa.
13. Si varias de las capas tienen niveles casi idénticos, utilizar un solo valor de compactación objetivo para todas las capas de relleno correspondientes.
14. Compactar la obra utilizando el mapa de compactación como guía para alcanzar una compactación uniforme en toda el área.
15. Con tiempo y experiencia en una región, los operadores capacitados podrán establecer valores de compactación y número de pasadas objetivos sin hacer uso de una franja de pruebas.
16. Si se desea una medida más precisa del nivel de compactación final, utilizar un compactador en modo de comprobación (amplitud baja, velocidad constante de 3 km/h (2 mph), frecuencia constante y en dirección hacia adelante solamente).





### El uso de los valores de la compactación inteligente sin calibración en la obra

Este proceso es el más pragmático y requiere muy poco o ningún tiempo adicional. Cabe mencionar que este proceso es el más adecuado para lo que se describió anteriormente como modo de producción de compactación y requiere experiencia en el sistema, entendimiento de cómo funciona la tecnología y el proceso de la compactación de suelos en general.

El objetivo de este proceso es utilizar la tecnología de la compactación inteligente para comparar el cambio relativo en la compactación con cada pasada y de esta manera saber cuándo la física detrás de los esfuerzos de compactación es la adecuada para las condiciones que se tienen. Como se mencionó anteriormente, el uso de la compactación inteligente y tecnología de medición integrada no es garantía de la compactación o densidad. A veces el proceso empleado es más importante que las herramientas y tecnología que se utilicen en la obra. Un compactador con ciertas características puede volverse ineficaz después de cierto número de pasadas sobre cierto material, haciendo que no se logre la compactación que se pretende alcanzar y que las pasadas posteriores sean una pérdida de tiempo. El conocer cuándo se presenta esta condición resultaría provechoso para así evitar la pérdida de tiempo y consumo de combustible innecesario.

1. Dimensionar el compactador de suelos vibratorio con compactación inteligente con base en las compactaciones que se pretenden alcanzar, tipos de suelo, niveles de humedad, grosor de las capas, etc. Los detalles que anteriormente se proporcionaron describen algunos factores a considerar durante el dimensionamiento y selección de la configuración del compactador.
2. Iniciar la compactación en la obra con la compactación inteligente ya configurada para producir un mapa con los valores de la compactación y comparar el cambio en porcentaje entre pasada y pasada.
3. Se podrá personalizar el mapa con colores específicos para cierto rango de cambio en porcentaje entre pasada y pasada. Por ejemplo, mostrar en color rojo las áreas que muestren un cambio en porcentaje de 50-100, amarillo para aquellas áreas que muestren un cambio en porcentaje de 10-49 por ciento y verde para cuando el cambio en porcentaje sea de 0-9. Podrá cambiar estos rangos con base en la experiencia o condiciones de la obra, según sea necesario.

4. Continuar con la compactación hasta que el mapa se muestre de color verde.
5. El área que no pueda mostrarse en color verde (poco o sin ningún cambio entre pasada y pasada) indicará que existe algún problema con el acomodamiento del suelo en esa área o que quizá el sub-suelo requiera atención.
6. Cuando el mapa está lo suficientemente verde y no se presentan cambios en los valores de la compactación entre pasada y pasada, utilice la prueba de carga de placa portátil o deflectómetro liviano como se describe en los ejemplos. Cerciórese que los puntos de prueba tengan un patrón uniforme en toda el área que se está compactando/probando, o el área que se desee, para comprobar si la compactación cumple o no con la compactación que se pretende alcanzar para la obra.
7. Si las pruebas muestran que la compactación tiene el nivel que se pretende lograr, se podrá continuar con el proceso como se describe.
8. Si las pruebas muestran que no se ha alcanzado la compactación, se podrá deber a una de estas dos situaciones: 1) El tamaño y peso de la máquina no son los correctos para el tipo de suelo y grosor de las capas y/o 2) el contenido de humedad en el suelo es incorrecto (muy seco o muy húmedo). De cualquier manera, el compactador no podrá ser capaz de presentar mejoras en la compactación hasta que algunas de las condiciones cambien.



## [ DETECCIÓN Y SOLUCIÓN DE PROBLEMAS EN LA COMPACTACIÓN INTELIGENTE ]

Como se mencionó anteriormente, las diferentes condiciones en la obra y factores operacionales pueden afectar los resultados de los sistemas de la compactación inteligente. Los operadores, por experiencia, comenzarán a reconocer ciertos patrones y a entender la causa probable de la desviación de los valores esperados. A continuación presentamos algunos problemas comunes, causas relacionadas y soluciones. El entender esta información le ayudará a resolver problemas en el menor tiempo posible.

### **Problema: Los valores de la compactación están por debajo de los valores esperados**

**Causa:** El suelo granular está demasiado seco y no se compacta. La compactación adicional rompe la estructura del suelo y lo descompacta.

**Solución:** Agregar humedad al suelo antes de continuar compactándolo. Los suelos granulares aceptan mucha agua sin hacerse muy húmedos ya que el agua tiende a drenarse. Agregar un poco más de agua que la cantidad ideal requerida para permitir que se drene y seque.

**Causa:** El suelo se compone de arcilla en lugar de grava o material granular o la arcilla está enterrada debajo del nivel de la superficie y afecta las mediciones.

**Solución:** Retirar el suelo arcilloso o aceptar valores más bajos. Alternativamente, utilizar la tecnología de la medición integrada en el compactador con base en energía, tal como el MDP, la cual no se ve tan afectada por suelos cohesivos.

**Causa:** El tambor está rebotando en las áreas más rígidas. Cuando el tambor rebota, los RMV son altos y los valores de medición de la compactación (CMV) tienden a estar por debajo de lo que las condiciones del suelo sugieren.

**Solución:** Configurar la amplitud en baja. Si continua rebotando, la compactación ha finalizado. De continuar compactando mientras se presenta el rebote puede resultar en des-compactación.

**Causa:** El suelo arcilloso está muy húmedo.

**Solución:** Utilizar un disco, rastra o mezclador rotatorio para excavar el suelo y dejarlo secar antes de compactar. Alternativamente, utilizar una tecnología de medición integrada al compactador con base en energía, tal como el MDP, la cual no se ve tan afectada por suelos cohesivos, pero tome en cuenta que los niveles de humedad pueden aún no ser los adecuados como para alcanzar la compactación adecuada.

**Causa:** El material que se está compactando se colocó sobre una base no estabilizada o no compactada. Como resultado, se está flexionando demasiado durante la compactación y no se compacta.

**Solución:** Se necesitará retirar la capa superior y corregir la capa inferior. Esto puede implicar dejar secar el suelo por completo y volverlo a compactar agregando cal o algún otro agente estabilizador o inclusive extraer el suelo pobre y reemplazarlo.

**Causa:** El tambor tiene una frecuencia mayor que la adecuada (esto es improbable).

**Solución:** La frecuencia del tambor deberá estar aproximadamente en 30 Hz (1800 VPM) para obtener los resultados más consistentes posibles. Recurrir a un mecánico para que determine por qué no funciona adecuadamente la velocidad de vibración y que lo corrija. Alternativamente, la tecnología de la medición integrada en el compactador con base en energía, tal como el MDP, podrá utilizarse en modo estático (vibración apagada) para ver si la uniformidad de los resultados de compactación se ve afectada.

**Causa:** Objeto u objetos enterrados que no son tan rígidos como el suelo a su alrededor; fosos con árboles u otras biomásas enterradas, basura enterada o bolas de arcilla. Se mostrará en el mapa como un área localizada.

**Solución:** Extraer y reemplazar el material con suelo adecuado si la situación es demasiado severa.

**Causa:** La velocidad del recorrido es muy alta.

**Solución:** Disminuir la velocidad para obtener una productividad más eficiente y valores de compactación más altos. Utilizar el control de la velocidad si el compactador está equipado con esta opción.

**Causa:** La dirección del recorrido afecta los valores de la medición integrada al compactador.

**Solución:** Esto es normal. Los valores son diferentes cuando el compactador se desplaza hacia adelante o en reversa. No existe solución salvo hacer que el compactador se desplace en una sola dirección o aceptar valores de compactación que resulten de solo una dirección durante el análisis.

### Problema: Los valores de la compactación exceden los valores esperados

**Causa:** El tipo de suelo de la base o sub-base es más rígido que el esperado.

**Solución:** Ninguna. Efectuar la prueba del penetrómetro dinámico de cono y revisar la resistencia al corte del subsuelo. Si es más rígido, aceptar los resultados como normales.

**Causa:** Objetos enterrados bajo la superficie. Puede tratarse de una piedra, losa de concreto, partes de pavimento o cimientos de un edificio.

**Solución:** Extraer el objeto para lograr una compactación uniforme.

**Causa:** La velocidad del recorrido en ocasiones es más lenta (esto es improbable, a menos que el operador esté tratando de compactar utilizando un número dado de pasadas).

**Solución:** Mantener una velocidad constante. Utilizar el control automático de velocidad si el compactador está equipado con esta opción.

**Causa:** El suelo está congelado.

**Solución:** Ninguna.

### Problema: Los valores de la compactación varían

**Causa:** Las condiciones del suelo superficial o del suelo bajo el nivel de la superficie varían. Esto es más común de lo que se cree. Objetos enterrados, cambios en el material de relleno y variación en el contenido de agua pueden afectar los valores que produce el sistema de medición integrado al compactador.

**Solución:** Si las variaciones son severas y necesitan rectificarse, implementar primero la solución más fácil: revisar el contenido de humedad del suelo y ajustarlo. Extraer objetos enterrados, de ser necesario, y reemplazar el suelo si es crítico.

**Causa:** Los valores que el sistema de medición integrado en el compactador produce cuando éste se desplaza hacia adelante son mayores/menores que los valores que se producen cuando se desplaza en reversa.

**Solución:** Esto es normal y varía según el tipo de suelo y nivel de compactación. Normalmente las diferencias se disminuyen conforme el suelo se hace más compacto.



**Causa:** El tambor rebota mientras se encuentra compactando. El rebote puede producir variaciones grandes en los valores que el sistema de medición integrado en el compactador produce ya que los valores promedio tienden a disminuir cuando el tambor comienza a rebotar en suelos más rígidos.

**Solución:** Cambiar a amplitud baja. Si hay rebote en amplitud baja, el suelo ha llegado a su máxima rigidez. Alternativamente, la tecnología de la medición integrada en el compactador con base en energía, tal como el MDP, podrá utilizarse en modo estático (vibración apagada) para ver si la uniformidad de los resultados de compactación se ve afectada.

## [ EL FUTURO DE LA COMPACTACIÓN INTELIGENTE ]

Como se mencionó anteriormente, la medición de la rigidez del suelo es extremadamente compleja por todas las variables que se presentan. Sin embargo, mientras más se utilice el IC, mejor se entenderán las capacidades y deficiencias de la tecnología. Conforme se adquiere experiencia en cuanto a su uso, surgirán nuevas tecnologías (como el Poder de Tracción de la Máquina) ofreciendo mayores beneficios y solución a problemas relacionados con las aplicaciones de las versiones anteriores. Conforme pasa el tiempo, el hardware será menos caro y más accesible.

El compactador del futuro muy probablemente tendrá más tecnologías de medición disponibles ya que cada tecnología tiene capacidades útiles diferentes. Quizá las nuevas tecnologías de medición que surjan consten de: radares que penetren el suelo, ultrasonido o imágenes por resonancia magnética o imágenes tridimensionales documentando toda la estructura de la carretera o tecnología sensible a la humedad dando aviso al operador para que se utilicen pipas de agua o máquinas desgarradoras. Los operadores tendrían acceso a la información de todas las máquinas en la obra (comunicación de máquina a máquina). La información que se proporcionaría sobre la evolución de la obra en tiempo real presentaría más ventajas que las que ahora se ven mediante varios compactadores o aparatos de medición. Los superintendentes de obra podrán supervisar y utilizar los datos para cualquier toma de decisión con base en la eficiencia de costos.

En el futuro los datos serán cada vez más importantes. Aquellos que proporcionen los sensores que aún están en vías de desarrollo y la capacidad para producirlos in situ con mayor facilidad y rapidez y transferirlos hacia aplicaciones externas (PC, Tablets portátiles y demás) será un área de desarrollo específico. Las tecnologías hoy en día ofrecen más datos que les resultan útiles a los gerentes e inspectores de obra. La capacidad para filtrarlos de manera externa, ordenarlos y crear un reporte de la obra conforme a las necesidades del usuario final será de gran importancia y un área donde muchas especificaciones prontamente podrán escribirse.

Este es un período emocionante en la ciencia de la compactación y el tiempo dictará los avances y tecnologías por venir. Pero una cuestión es cierta: en la medida en que la compactación inteligente ofrezca ahorros en costos, calidad y eficiencia se requerirán más tecnologías en las especificaciones de las obras a nivel mundial.

APÉNDICE

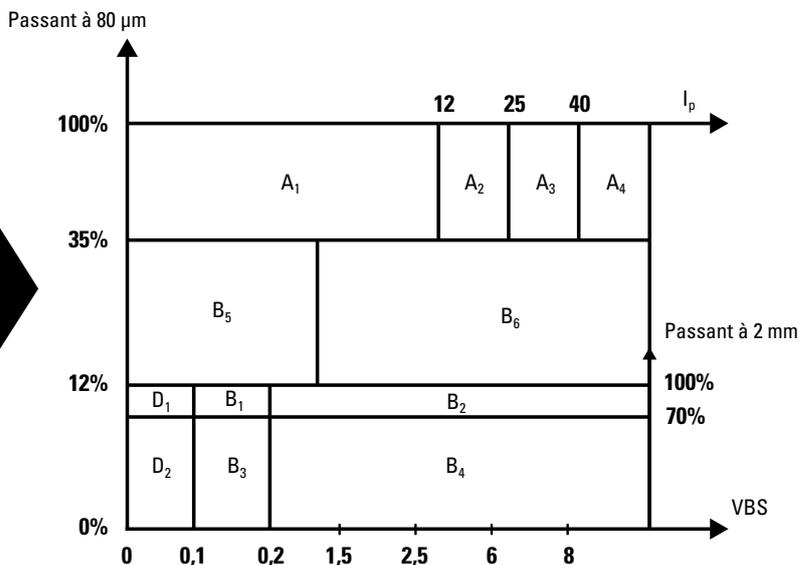
[ SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS ]

<b>AASHTO CLASSIFICATION OF HIGHWAY SUBGRADE MATERIALS</b> (with suggested subgroups)											
General Classification	Granular Materials (35% or less passing #200)							Silt-Clay Materials (more than 35% passing #200)			
Group Classification	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
<b>Sieve Analysis Percent Passing:</b>											
# 10	0-50		51-100								
#40	0-30	0-50	0-10	0-35	0-35	0-35	0-35	36-100	36-100	36-100	36-100
#200	0-15	0-25	0-10	0-35	0-35	0-35	0-35	36-100	36-100	36-100	36-100
<b>Characteristics of Fraction Passing #40:</b>											
Liquid Limit				0-40	41+	0-40	41+	0-40	41+	0-40	41+
Plasticity Index	0-6		N.P.	0-10	0-10	11+	11+	0-10	0-10	11+	11+
<b>Group Index</b>	0		0	0		0-4		0-8	0-12	0-16	0-20
<b>Usual Types of Significant Constituent Materials</b>	Stone Fragments Gravel and Sand		Fine Sand	Silty or Clayey Gravel and Sand				Silty Soils		Clayey Soils	
<b>General Rating as Subgrade</b>	Excellent to Good						Fair to Poor				

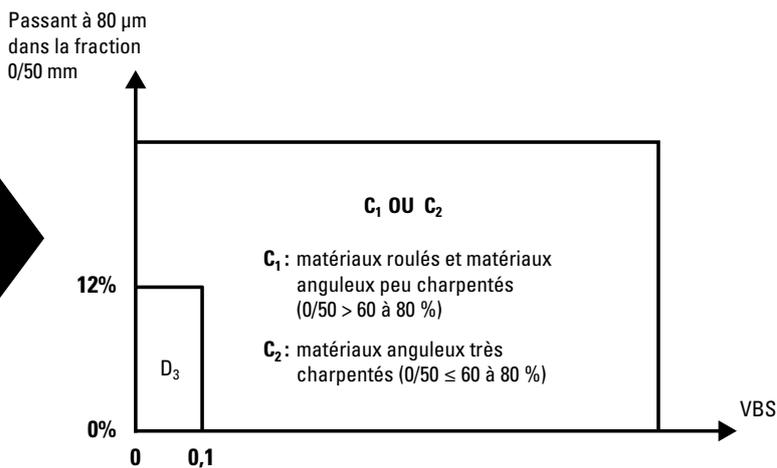
Sistema de Clasificación de Suelos de AASHTO

## Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature

**Sols**  
**D<sub>max</sub> ≤ 50 mm**



**Sols**  
**D<sub>max</sub> > 50 mm**



**Matériaux rocheux**

Roches sédimentaires	Roches carbonatées	Craies	R <sub>1</sub>
		Calcaires	R <sub>2</sub>
	Roches argileuses	Marnes, argilites, pélites...	R <sub>3</sub>
	Roches siliceuses	Grès, poudingues, brèches...	R <sub>4</sub>
	Roches salines	Sel gemme, gypse	R <sub>5</sub>
Roches magmatiques et métamorphiques	Granites, basaltes, andésites, gneiss, schistes métamorphiques et ardoisiers...		R <sub>6</sub>

**Matériaux particuliers**

Sols organiques et sous-produits industriels	F
--	---

Sistema Francés de Clasificación de Suelos

Hauptgruppe	Korngrößenanteil ≤ 0,06 mm	Korngrößenanteil > 2,0 mm	Gruppe (allgemein)	Gruppe (detailliert)	Kurzzeichen Gruppensymbol
Grobkörniger Boden	≤ 5	< 40	Kies	Enggestufte Kiese	GE
				Weitgestufte Kies-Sand-Gemische	GW
				Intermittierend gestufte Kies-Sand-Gemische	GI
			Sand	Enggestufte Sande	SE
				Weitgestufte Sand-Kies-Gemische	SW
				Intermittierend gestufte Sand-Kies-Gemische	SI
Gemischtkörniger Boden	5 bis 40	< 40	Kies-Schluff	5 bis 15 Gew.-% ≤ 0,06 mm	GU
				15 bis 40 Gew.-% ≤ 0,06 mm	GU*
			Kies-Ton	5 bis 15 Gew.-% ≤ 0,06 mm	GT
				15 bis 40 Gew.-% ≤ 0,06 mm	GT*
		≤ 40	Sand-Schluff	5 bis 15 Gew.-% ≤ 0,06 mm	SU
				15 bis 40 Gew.-% ≤ 0,06 mm	SU*
			Sand-Ton	5 bis 15 Gew.-% ≤ 0,06 mm	ST
				15 bis 40 Gew.-% ≤ 0,06 mm	ST*
Feinkörniger Boden	< 40	—	Schluff	Leicht plastische Schluffe $W_L \leq 35$	UL
				Mittelpastische Schluffe $W_L = 35$ bis 50	UM
			Ton	Leicht plastische Tone $W_L \leq 35$	TL
				Mittelpastische Tone $W_L = 35$ bis 50	TM
				Ausgeprägt plastische Tone $W_L = 50$	TA
				—	—
Organogener Boden	< 40	—	Nicht brenn- und schwelbar	Organogene Schluffe $W_L = 35$ bis 50	OU
	≤ 40			Organogene Tone $W_L > 50$	OT
				Grob bis gemischtkörnige Böden mit humosen Beimengungen	OH
				Grob bis gemischtkörnige Böden mit kalkigen, kieseligen Bildungen	OK
Organischer Boden	—	—	Brenn- und schwelbar	Nicht bis mäßig zersetzte Torfe	HN
				Zersetzte Torfe	HZ
				Mudden (Faulschlamm)	F
Auffüllung <sup>1</sup>	—	—	—	Auffüllung aus Fremdstoffen	A

1 - Eine Auffüllung ist eine unter menschlicher Einwirkung entstandene Schüttung aus natürlichen Böden oder Fremdstoffen.

Sistema Alemán de Clasificación de Suelos

## USCS SOIL CLASSIFICATION SYSTEM

SOIL FRACTION	SYMBOL	SIZE RANGE
<b>Boulders</b>	<b>None</b>	Greater than 12"
<b>Cobbles</b>	<b>None</b>	75 mm (3") to 12"
<b>1- Course Grained Soils:</b>		
<b>Gravel</b>	<b>G</b>	75 mm (3") to #4 Sieve (4.25 mm)
Course Gravel		75 mm to 19 mm
Fine Gravel		#4 Sieve to 19 mm
<b>Sand</b>	<b>S</b>	#4 Sieve to #200 Sieve (0.075 mm)
Course Sand Medium Sand Fine Sand		
<b>2- Fine Grained Soils:</b>		
Fines		Less than #200 Sieve
Silt	<b>M</b>	Use Atterberg Limits
Clay	<b>C</b>	Use Atterberg Limits
<b>3- Organic Soils</b>		
	<b>O</b>	Use Atterberg Limits
<b>4- Peat</b>		
	<b>Pt</b>	Visual Identification
<b>Gradation Symbols</b>		<b>Liquid Limit Symbols</b>
Well-graded	<b>W</b>	High LL
Poorly-graded	<b>P</b>	Low LL
		<b>H</b>
		<b>L</b>

*Sistema Unificado de Clasificación de Suelos*

SOIL GROUPS GRAVEL and SAND may be qualified sandy GRAVEL and gravelly SAND where appropriate			SUB-GROUPS and in-laboratory identification				
			GROUP SYMBOL	SUB-GROUP SYMBOL	FINES % < 0.06 mm	LIQUID LIMIT	
COARSE SOILS less than 35% of the material is finer than 0.06 mm	GRAVELS More than 50% of coarse material is of gravel size (coarser than 2 mm)	Slightly silty or clayey GRAVEL	G GW GP	GW GPu CPg	0 to 5		
		Silty GRAVEL	G-F	G-M	GWM GPM	5 to 15	
		Clayey GRAVEL		G-C	GWC GPC		
		Very silty GRAVEL	GF	GM	GML, etc.	15 to 35	
		Very clayey GRAVEL		GC	GCL GCI GCH GCV GCE		
	SANDS More than 50% of coarse material is of sand size (finer than 2 mm)	Slightly silty or clayey SAND	S SW SP	SW SPu SPg	0 to 5		
		Silty SAND	S-F	S-M	SWM SPM	15 to 35	
		Clayey SAND		S-C	SWC SPC		
		Very silty SAND	SF	SM	SML, etc.	15 to 35	
		Very clayey SAND		SC	SCL SCI SCH SCV SCE		
FINE SOILS more than 35% of the material is finer than 0.06 mm	Gravelly or sandy SILTS and CLAYS 35% to 65% fines	Gravelly SILT	FG	MG	MLG, etc.		
		Gravelly CLAY		CG	CLG CIG CHG CVG CEG		
		Sandy SILT	FS	MS	MLS, etc.		
	Sandy CLAY	CS		CLS, etc.			
	SILTS and CLAYS 65% to 100% fines	SILT (M SOIL)	F	M	ML, etc.		
		CLAY		C	CL CI CH CV CE		< 35 35 to 70 50 to 70 70 to 90 > 90
	<b>ORGANIC SOILS</b>		Description letter 'O' suffixed to say group or sub-group symbol		Organic matter in significant amount e.g. MHO – organic silt of high LL		
<b>PEAT</b>		Pt – consists predominantly of plant remains (fibrous or amorphous)					

**Primary Letter**

G = Gravel  
S = Sand  
M = Silt  
C = Clay  
O = Organic Soil  
Pt = Peat

**Secondary Letter**

W = Well graded  
P = Poorly graded  
M = With non-plastic fines  
C = With plastic fines  
L = Of low plasticity (LL < 50)  
H = Of high plasticity (LL > 50)

Classification v1.00 Sept 2010

Sistema Inglés de Clasificación de Suelos

[ REQUERIMIENTOS DE COMPACTACIÓN ]

Aparatos integrados en el compactador continuamente controlando la compactación de suelos

BASIC/MINIMUM REQUIREMENTS					
One of the lower 3 blocks (one value)	At least 2 blocks	3 top blocks	Top block or 4 lower blocks	2 lower blocks	At least one block
		Time stamp	Close-loop mode		
Qualitative observation (ex: double-jump...)		Mapping on board	Actual N passes	Data post-treatment facilities, & additional information	
Dimensional bearing capacity (ex: modulus...)	Number of passes (actual vs. target value)	Automatic positioning on board 2D or 3D	Actual frequency	Result by histogram and statistics	Data exchange between machines
Dimensional (ex: stiffness...)	Relative evolution (% related to target values D or ND)	Manual positioning 2D + layer (optional)	Actual amplitude A0	Result by distance or surface	Remote data exchange
Non-dimensional value	End of compaction (D or ND)	Distance 1D	Actual speed V	Identification of machine and CCC device	Data exchange from office (USB stick)
<b>1</b> Behaviour of the material (dynamic response)	<b>2</b> Status of compaction (Comparison)	<b>3</b> Positioning, traceability during process	<b>4</b> Operational information (record and display)	<b>5</b> Control report, documentation	<b>6</b> Communication, others

Del folleto CECE – Directrices para evaluar compactadores de suelo y asfalto equipados con control continuo de compactación (CCC)

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

### - A -

<b>Agregados</b>	Componente granular de la estructura de una carretera que soporta la carga, normalmente consiste en arena, grava, concha, escoria, piedra triturada o finos.
<b>Amplitud</b>	Dimensión de la mitad de la distancia "pico-a-pico" del movimiento vertical total de un tambor vibrador durante un ciclo completo.
<b>Arcilla</b>	Material térreo de grano fino que utiliza las cargas electro-químicas superficiales para ligarse bien con el agua.
<b>Arena</b>	Partícula de material mineral no-cohesivo, con forma y tamaño definidos.
<b>Aseguramiento de Calidad (QA)</b>	Los métodos de pruebas y datos que utiliza el dueño del proyecto para documentar la calidad de la compactación lograda en el proyecto.
<b>Asentamiento</b>	El proceso de disminuir la elevación de la superficie debido a la consolidación del material de relleno.

### - B -

<b>Base</b>	También se le llama la "Capa de Base". Es una capa de cierto grosor, de material especificado o seleccionado, tendida sobre la sub-base y que tiene varias funciones, incluyendo la de distribuir la carga, permitir el drenado y minimizar la acción del congelamiento-deshielo.
<b>Bien Graduado</b>	Característica de los suelos compuestos de granos gruesos que contienen partículas de diferentes tamaños, haciéndolos más fáciles de compactar.

### - C -

<b>Calibración</b>	El proceso de ajustar los parámetros del sistema para maximizar su capacidad al aplicarlos en el material de la obra.
<b>Capa (Lift)</b>	Un solo estrato de material colocado. Puede variar en espesor.
<b>Capacidad de Carga</b>	La capacidad de un material para soportar una carga.
<b>Capilaridad</b>	La capacidad de un material para absorber el agua hacia arriba o lateralmente.
<b>Carga Lineal</b>	La medida que utiliza la industria para comparar el potencial de compactación de los compactadores estáticos de tambor liso.
<b>Coefficiente de Uniformidad</b>	Parámetro que describe la distribución de tamaños de partículas (curva de graduación) de un suelo.
<b>Cohesión</b>	La capacidad que tiene un material para mantener su resistencia cuando no está confinado, es decir, de adherirse y mantener su forma durante cambios en el contenido de humedad o sumersión.
<b>Compactación</b>	El proceso de reducir los huecos en un material por medio de la manipulación mecánica, aumentando así su densidad.
<b>Compactación Inteligente</b>	En general, la compactación inteligente se puede describir como una tecnología integrada a una máquina compactadora que se aplica al proceso de compactación para mejorar la eficiencia en la obra eliminando las conjeturas humanas.

<b>Compactibilidad</b>	El grado al que el material del suelo puede sobreponerse la resistencia a la deformación de un material específico.
<b>Compresibilidad</b>	El nivel al que un material se reduce en volumen cuando se le aplica una fuerza.
<b>Control de la Compactación Integrado a la Máquina</b>	Medir la compactación con tecnologías incorporadas a la máquina compactadora.
<b>Contenido de Humedad</b>	La cantidad de líquido (agua) por volumen en una masa.
<b>Control de Calidad (QC)</b>	El procedimiento que implementa un contratista para asegurar que el trabajo de compactación se termine cumpliendo con todas las especificaciones.

## - D -

<b>Densidad</b>	El índice de masa por unidad de volumen; un indicador tradicional de la resistencia a la carga.
<b>Desacoplamiento</b>	También se conoce como "doble impacto". Es un fenómeno que ocurre cuando el tambor rebota debido al impacto vibratorio y bota a tal altura que permite que la siguiente vibración ocurra mientras el tambor está todavía en el aire.
<b>Des-compactación</b>	Pérdida de compactación debido a la reaplicación de alguna fuerza de compactación innecesaria.
<b>Distribución de Partículas</b>	Ver Distribución de Tamaños de Grano.
<b>Distribución de Tamaños de Granos (Granulometría)</b>	Es la distribución porcentual y límites de los diferentes tamaños de partículas de un suelo.
<b>Doble-impacto</b>	Ver Desacoplamiento.

## - E -

<b>Elasticidad</b>	La tendencia que tiene un material de volver a su forma original (o casi original) después de retirar la carga de compresión.
<b>Estabilización del Suelo</b>	El proceso de maximizar la adecuación del suelo a las necesidades de cierto proyecto de construcción.
<b>Estación</b>	Un área definida por los ingenieros y demarcada con estacas en la obra para controlar la preparación por secciones manejables.

## - F -

<b>Finos</b>	En general, materiales con tamaño de partículas muy pequeño, por debajo de cierto límite establecido por las pruebas de tamizado. Los finos pueden pasar por la malla más cerrada. Diferentes organizaciones alrededor del mundo tienen definiciones independientes del tamaño preciso de la malla, pero son aproximadamente iguales.
<b>Frecuencia de resonancia</b>	En el caso de los compactadores vibratorios, es el punto en el que la vibración del material del suelo contribuye a la vibración del compactador lo suficiente como para causar que el esfuerzo de compactación exceda la fuerza centrífuga generada., es decir, el resultado es mayor que el esfuerzo.
<b>Fuerza Centrífuga</b>	La fuerza que hace que un peso giratorio desbalanceado acelere hacia fuera de su eje.
<b>Fuerza Total Aplicada</b>	El cálculo de la cantidad máxima de energía de vibración que puede aplicar un compactador sobre el suelo.

## GLOSARIO

<b>Frecuencia</b>	Medición del número de ciclos completos (vibraciones) durante un lapso determinado.
<b>Frecuencia Natural</b>	La frecuencia a la que vibra una masa debido a sus características propias.
<b>- G -</b>	
<b>Global</b>	Término muy general que se usa para describir las tecnologías de mapeo basadas en satélites.
<b>GLONASS</b>	Una constelación de satélites rusos similar al GPS.
<b>Graduación</b>	La escala de tamaños de partículas que forman el suelo.
<b>Gradiente de Compactación</b>	El grado de compactación en toda la profundidad de influencia. El suelo tiende a estar menos compactado en la superficie, más compacto en una gran zona central y de nuevo menos compacto en lo más profundo de la zona de influencia.
<b>Graduado uniforme</b>	También se conoce como pobremente graduado; es la característica de los suelos de grano grueso de contener partículas de tamaño relativamente uniforme, haciéndolos difícil de compactar.
<b>Grano</b>	Una partícula de mineral.
<b>Grava</b>	Material mineral de grano grueso, definido por USCS como: partículas de menos de 75 mm (3 in) de diámetro que no pasan a través de una malla #4.

### - I -

<b>Impacto</b>	Fuerza de mayor amplitud creada al convertir una presión estática en dinámica; por ejemplo, al dejar caer un peso. Golpes de baja frecuencia o de frecuencia irregular (percusiones de 50-600 golpes por minuto) se consideran fuerzas de impacto.
<b>Índice de Plasticidad</b>	La diferencia entre el Límite Líquido y el Límite Plástico de un suelo. Este parámetro se utiliza para determinar el grado de estabilización que se requiere en el caso de suelos de grano fino.

### - L -

<b>Límite líquido</b>	Un límite Atterberg muy significativo; es el punto en el cual el suelo contiene tanta agua que se considera un líquido.
<b>Límite Plástico</b>	Un límite Atterberg muy significativo; es el punto en el que un suelo retiene suficiente humedad para hacerse plástico.
<b>Limo</b>	Material mineral de grano fino.

### - M -

<b>Método de Desplazamiento</b>	Método para medir la rigidez del suelo utilizando las características del tambor y midiendo la aceleración del mismo para calcular su desplazamiento.
<b>Método de Energía de Tracción de la Máquina</b>	El principio del método de Energía de Tracción de la Máquina (MDP) (que es un método patentado por Caterpillar), está basado en la energía que se requiere para vencer la resistencia a la rodadura.
<b>Método de Límites</b>	Conjunto de normas que describen las características de las siete etapas del suelo al de "Atterberg" cambiar de estado sólido a líquido. Las etapas más importantes son las del Límite Plástico y el Límite Líquido.

<b>Método para Medir el Valor de Compactación</b>	Método para demostrar la rigidez del suelo, inventado por la compañía suiza Geodynamik y utilizado por Caterpillar.
<b>Manipulación</b>	Proceso de fuerzas ejercidas en todas direcciones para reacomodar las partículas y formar una masa más densa.
<b>Modo de Producción</b>	Una configuración del sistema del compactador que optimiza el desempeño del sistema para aplicaciones de alta producción en los que el objetivo principal no es la precisión.
<b>Modo de Comprobación</b>	Una configuración del sistema del compactador para optimizar el desempeño del sistema en aplicaciones que requieren una alta precisión y en las que la productividad de la máquina no es el objetivo principal.

## - P -

<b>Pasada</b>	El número de veces que pasa un compactador sobre un área específica de terreno. A veces una "pasada" se define como un recorrido de ida y vuelta, pasando dos veces sobre la misma área, y otras veces una pasada significa un solo pase de la máquina compactadora sobre un área. Caterpillar define una pasada como un solo pase de la máquina sobre un área específica, ya sea en dirección hacia adelante o hacia atrás.
<b>Pendiente</b>	El grado de inclinación una superficie.
<b>Permeabilidad</b>	La capacidad de un material para permitir el pasaje de un gas o líquido.
<b>Plasticidad</b>	La propiedad de un suelo de grano fino que le permite deformarse más allá del punto de recuperación sin agrietarse o sin cambio de volumen apreciable.
<b>Pobrementemente graduado</b>	También se conoce como uniformemente graduado; es una característica que tienen algunos suelos de grano grueso de estar compuestos por partículas de tamaño uniforme, haciéndolos difíciles de compactar.
<b>Presión estática</b>	Colocar un peso aplicado al esfuerzo de compactación.
<b>Prueba Proctor (Estándar o Modificada)</b>	Una prueba de laboratorio que determina la densidad máxima del material del suelo en estado seco, así como el contenido máximo de agua para lograr su máxima densidad.

## - R -

<b>Recuperación</b>	El proceso de alterar el suelo por medios químicos o mecánicos para mejorar sus propiedades físicas.
<b>Resonancia</b>	La convergencia de las frecuencias vibratorias de dos masas en vibración.
<b>Resistencia al Corte</b>	La capacidad de las partículas del suelo para resistir el deslizamiento sobre si mismas cuando se aplica una fuerza de compactación.
<b>Resistencia a la Rodadura</b>	La cantidad de energía que se necesita para rodar una forma redonda sobre un material.
<b>Rigidez (Suelo)</b>	La capacidad de un material (suelo) para resistir la deflexión bajo carga; un indicador importante de la resistencia a la carga.

## - S -

<b>Sistema de Posicionamiento Global (GPS)</b>	Un sistema global de navegación por radio controlado por los EE.UU. compuesto por una constelación de 24 satélites y sus estaciones terrestres.
--	---

## GLOSARIO

<b>Sistema Satelital de Navegación (GNSS)</b>	incluyendo GPS y GLONASS.
<b>Sub-base</b>	La capa entre el Subrasante y la base
<b>Subrasante</b>	El suelo preparado para soportar una estructura para tráfico. Básicamente, sirve como cimiento de la estructura y se le llama también "suelo natural" o "suelo de base."
<b>Suelo</b>	Material no consolidado compuesto de partículas de mineral, con o sin sustancias orgánicas.
<b>Suelos de Grano Grueso</b>	Suelos compuestos por partículas (granos) que carecen de cohesión. La arena y la grava se consideran suelos de de grano grueso. Los suelos de grano grueso se definen como bien graduado o pobremente graduado, lo que refleja la capacidad de los suelos para ser compactados.
<b>Suelos de granulometría fina</b>	Suelos compuestos predominantemente de finos.
<b>- T -</b>	
<b>Terraplén</b>	Cualquier relleno cuya superficie es más alta que la superficie adjunta.
<b>Textura</b>	La característica que define la fricción superficial de una partícula de suelo.
<b>- U -</b>	
<b>Uniformidad</b>	Mantener la consistencia en los materiales y las aplicaciones.
<b>- V -</b>	
<b>Valor de Compactación (CMV)</b>	Un indicador de la rigidez del suelo que se calcula midiendo la fuerza - G a la frecuencia de vibración del tambor y de la primera armónica (2x la frecuencia vibratoria del tambor).
<b>Vibración</b>	Serie de golpes de alta frecuencia (1400-4000 golpes por minuto) que producen una sucesión rápida de ondas de presión. Las vibraciones producidas por una máquina compactadora pueden romper las ligas entre las partículas del material que se está compactando.
<b>Vacío o hueco</b>	Un espacio dentro de un material que no está ocupado por material mineral sólido.
<b>Valor del Medidor de Resonancia (RMV)</b>	Indica el grado en que se está desacoplando el tambor.









SAFETY WARNINGS

- Warning symbol: Falling object
- Warning symbol: Moving parts
- Warning symbol: Falling blade
- Warning symbol: Falling object

STUBBERS

STUBBERS



**CAT** CS78B



**CATERPILLAR**