

1. COMPACTACIÓN

1.1 Conceptos Fundamentales.

La palabra “compactación” resulta de sustantivar el adjetivo “compacto”, que deriva del latín “compactus”, participio pasivo de “compingere” que quiere decir unir, juntar.

Para entender de que se trata la compactación de los suelos podríamos decir que es el mejoramiento artificial de sus propiedades mecánicas como lo es la resistencia, la compresibilidad y su relación esfuerzo-deformación, el proceso de compactación implica una reducción más o menos rápida de los vacíos, como una consecuencia de esto ocurren cambios de volumen, ligados principalmente a la pérdida de volumen de aire.

El principal objetivo de una compactación es obtener un suelo de tal manera estructurado que posea y mantenga un comportamiento mecánico adecuado a través de toda la vida útil de la obra. Las propiedades requeridas pueden variar del tipo de suelo, pero las propiedades mencionadas anteriormente son las que figuran cuyo mejoramiento se busca siempre. Es menos frecuente aunque no menos importante, que también se compacte para tener unas características de permeabilidad y flexibilidad. Esto suele ser favorable ante efectos de permanencia de la estructura terrea ante la acción de agentes erosivos.

La compactación resulta ser un proceso de objetivos múltiples es evidente que muchos de esos objetivos serán contradictorios en muchos problemas concretos, en el sentido de que se emprendan para cumplir con uno pudieran perjudicar algún otro. Por ejemplo que en una compactación intensa produce un material muy resistente, pero sin duda muy susceptible al agrietamiento. Estas contradicciones se amplían si se toma en cuenta que los suelos compactados suelen tener una vida extensa y que es un compromiso que conserven sus propiedades en toda su vida como lo es bajo la acción del agua, de las cargas soportadas, etc. Las altas resistencias obtenidas con compactaciones muy enérgicas pueden traer como consecuencias que un suelo muy compactado podrá, en general absorber mucha agua si se dan las condiciones propicias y al hacerlo su resistencia podría descender drásticamente, en tanto que ese mismo suelo inicialmente compactado en forma menos enérgica, con menor resistencia inicial, podrá resultar mucho más estable ante el agua, manteniendo en el tiempo una resistencia inicialmente menor que la del otro, pero probablemente suficiente.

Desde el principio el problema de la compactación de suelos resulta ligado al control de calidad de los trabajos de campo. En efecto, después de realizar un proceso de compactación siempre es necesario verificar si con él se lograron los fines propuestos.

Para medir la resistencia, la compresibilidad, la relación esfuerzo-deformación, la permeabilidad o la flexibilidad de los suelos se requieren pruebas relativamente especializadas y costosas que, además, suelen requerir un tiempo de ejecución demasiado largo para controlar un proceso de compactación que avance de manera normal. En los primeros años de la aplicación de las técnicas modernas de compactación, indicaron que existe una correlación que en aquella época se juzgó muy confiable entre las propiedades fundamentales ya mencionadas y el peso volumétrico seco a que llega el material compactado, de manera que puede decirse que a mayor peso volumétrico seco se alcanza una situación más favorable en el suelo compactado. Debido a que la prueba de peso volumétrico es fácil y sencilla de realizar, se hizo costumbre controlar la compactación determinando el peso volumétrico seco de los materiales compactados.

Sin embargo la correlación entre las propiedades fundamentales y el peso volumétrico seco no es tan segura y simple como para permitir la aplicación ciega de la norma anteriormente

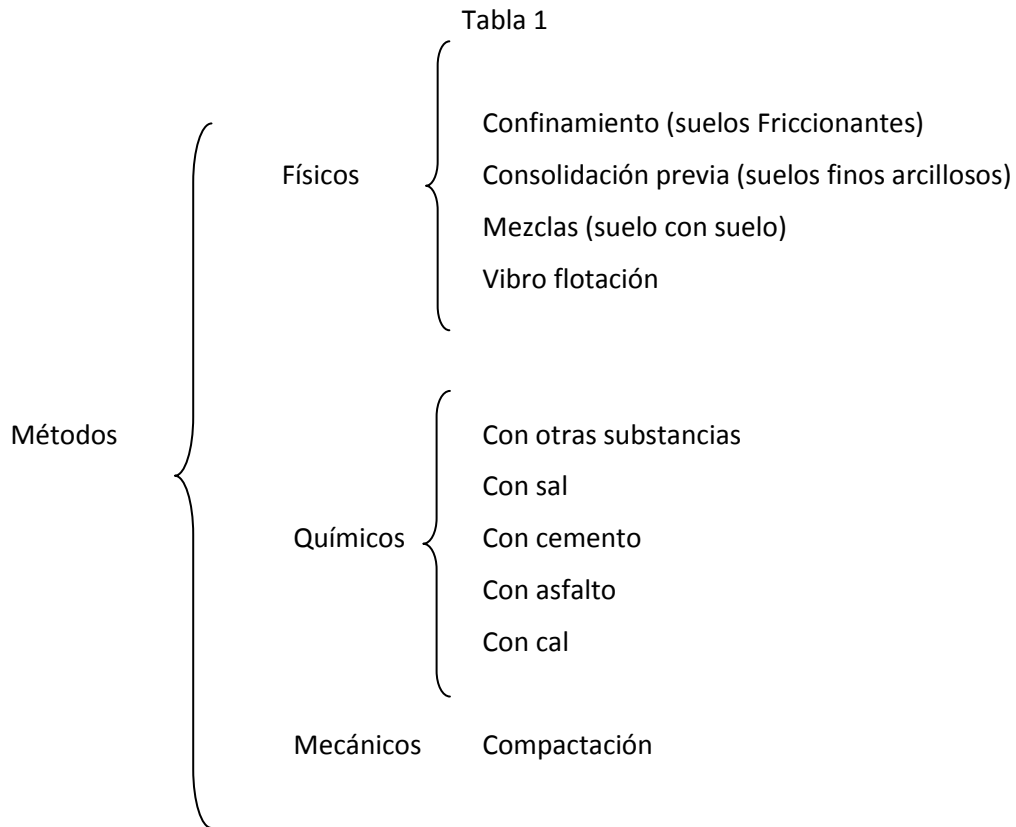
mencionada, esta aplicación realizada sin tener en cuenta las peculiaridades y objetivos de cada caso o la confiabilidad de la correlación, es quizá la fuente más común de errores que se cometen en la aplicaciones prácticas de las técnicas de compactación.

Ahora en realidad el aumento del peso volumétrico es meramente un medio, donde el mejoramiento de la propiedades está directamente ligado al aumento del peso volumétrico, el uso de la sencilla correlación que se menciona proporciona magníficos resultados, pero en algunos casos la correlación se vuelve muy errática o incluso llaga a invertirse, en tanto que en otros, algunas otras variables desempeñan un papel fundamental.

En general, son mucho más complejos los problemas ligados a cuanto pueden mejorarse las características fundamentales de los suelos comparados cuando estos son finos, razón por la cual las arcillas suelen ser los materiales que más se investigan al tratar de definir las propiedades mecánicas de los suelos compactados.

La compactación ha figurado entre las técnicas de construcción desde las épocas más remotas de que se tiene noticia, si bien en la antigüedad su aplicación no era general ni sistemática el método utilizado fue el de apisonado por medio de animales o personas en épocas muy lejanas.

La compactación es uno de los varios medios de que hoy se dispone para mejorar la condición de uso de un suelo que haya de usarse en construcción; es, además, uno de los más eficientes y de aplicación más universal.



Por lo general, las técnicas de compactación se aplican a rellenos artificiales, tales como cortinas para presas de tierra, diques, terraplenes para caminos y ferrocarriles, bordos de defensa, muelles, pavimentos, etc. En ocasiones se hace necesario compactar el terreno natural, como en el caso de una cimentación sobre arenas sueltas. Así, la compactación de los suelos es, ante todo, un problema constructivo, de campo.

La eficiencia de cualquier proceso de compactación depende de varios factores y para poder analizar la influencia particular de cada uno se requiere disponer de procedimientos estandarizados que reproducen los procesos de compactación de campo en el laboratorio, en forma representativa (hasta donde sea posible). De esa manera, pasan a primer plano de interés las pruebas de compactación de laboratorio y los estudios que en este han de hacerse en torno a tales procesos.

Los estudios de compactación en laboratorio también desempeñan un papel muy importante en el control de calidad de los trabajos. Los procesos de compactación han de estudiarse con referencia a las técnicas de campo y a todo un conjunto de técnicas de laboratorio.

Variables que afectan la compactación de los suelos.

Un suelo puede compactarse de diferentes maneras y en cada caso se obtendrá un resultado diferente, si se realiza una misma forma de compactación dará resultados distintos si se aplica a suelos diferentes, si se aplica una misma forma de compactar a un suelo determinado, podrán obtenerse resultados diferentes si de un caso a otro varían condiciones de las prevalecientes en dicho suelo.

Estos factores que pueden influir en los resultados de una compactación se mencionan a continuación.

- La naturaleza del suelo. El tipo de suelo con que se trabaja influye de manera muy importante en el proceso de compactación. Prevalece la distinción usual entre suelos finos y gruesos o entre suelos arcillosos y friccionantes.
- El método de compactación. Existen tres tipos de métodos de compactación: por impacto, por amasado y por aplicación de carga estática, estos métodos producen resultados diferentes tanto en su estructuración como, en las propiedades del material que se compacta

Es común que los métodos utilizados en campo sean más difíciles de diferenciar, es más común describirlos por el tipo de maquinaria que se va a utilizar, y así se habla de la compactación de rodillo liso, con rodillo neumático, con equipo vibratorio, etc. Se supone que los procesos de laboratorio reproducen las condiciones del proceso de campo, pero es muy difícil hacer una correspondencia clara o precisa entre la operación de trabajo de campo y las pruebas de laboratorio, en el sentido de que estas últimas reproduzcan en forma representativa las condiciones del suelo compactado en el campo.

- La energía específica. Se entiende por energía específica de compactación la que se entrega al suelo por unidad de volumen, durante un proceso mecánico. Es muy fácil evaluar la energía en una prueba de laboratorio donde se compacte el suelo por impactos dados por un pisón, para este caso resulta claro que la energía es expresada por la siguiente ecuación:

$$E_e = \frac{Nn Wh}{V}$$

Donde:

E_e = energía específica.

N = número de golpes del pisón compactador por cada una de las capas en las que se acomoda el suelo en molde de compactación.

n = número de capas que se disponen hasta llenar el molde.

h = altura de caída del pisón al aplicar los impactos al suelo.

W = peso del pisón compactador.

V = volumen total del molde de compactación igual al volumen total de suelo compactado.

El concepto de energía específica conserva su valor cuando se relaciona con sus procedimientos de compactación de campo. En el caso de maquinaria como lo son los rodillos depende principalmente de la presión y el área de contacto entre los rodillos y el suelo, del espesor de la capa que se vaya a compactar y del número de pasadas del equipo.

- El contenido de agua del suelo. Proctor puso de manifiesto que el contenido de agua del suelo que se compacta es otra variable fundamental del proceso. Se observa que con contenidos de agua crecientes, a partir de valores bajos en contenido, se obtienen altos pesos específicos secos para el material compactado, si se usa la misma energía de compactación, pero también que esta tendencia no se mantiene indefinidamente, ya que cuando la humedad excede de cierto valor, disminuyen los pesos específicos secos logrados. Proctor puso de manifiesto que para un suelo dado y utilizando un determinado procedimiento de compactación, existe un contenido de agua de compactación, llamado el óptimo, que es el que produce el máximo peso volumétrico seco que se debe de obtener con ese procedimiento de compactación.

En un proceso de compactación de campo, dicho contenido de agua es el óptimo que se debe utilizar para el equipo y la energía correspondientes.

- La diferencia de contenidos de agua. Esto llega a afectar las pruebas de compactación que se realizan principalmente en el laboratorio, en las que se representa sobre todo los resultados en la gráfica $w - \gamma_d$ (peso volumétrico seco contra humedad). Las que se presenta en un suelo relativamente seco es muy diferente a uno que se le va agregando agua o si también se parte de un suelo que este húmedo, que se va secando según se avance en la prueba. Las investigaciones realizadas comprueban que en el primer caso se obtienen pesos volumétricos secos altos que en el segundo, para un mismo suelo y con los mismos contenidos de agua lo que se traduciría para este fenómeno que podría ser cuando el suelo está seco y se le agrega agua esta tiende a quedarse en la periferia de las partículas, con la tendencia de penetrar en ellas después de un tiempo. Cuando el agua se evapora al irse secando el suelo húmedo, la humedad superficial de las partículas se hace mayor que la interna, por lo tanto se tiene condiciones diferentes en las partículas del suelo con un mismo contenido de humedad, en el primer caso que se agregó agua, la presión capilar entre las partículas es menor por el exceso de agua y en el segundo caso la evaporación hace que las partículas se compenetren más. Por lo consiguiente en el primer caso será menor la adherencia entre partículas y una misma energía de compactación será más eficiente para compactar el suelo que en segundo caso.

También cabe mencionar que se ven influidos por el tiempo que se dejen pasar entre la incorporación del agua y el momento en que se aplique la energía de compactación, pues si el lapso es largo, se permite la incorporación uniforme del agua en las partículas del suelo, con lo que se disminuye su humedad superficial y aumentan sus presiones capilares. En el laboratorio de geotecnia es común que se proceda a partir de un suelo relativamente seco, al cual se le incorpora agua según avanza la prueba y se deja reposar el tiempo suficiente tras la incorporación, que en general es un tiempo de 24 horas, para permitir la distribución uniforme del agua.

- Contenido de agua del banco. Nos referimos en este concepto al contenido de agua natural que el suelo posee antes de añadir o quitar humedad para compactarlo, en busca del contenido óptimo.

Por lo general pueden lograrse cambios relativamente pequeños al humedecer o secar el suelo extendido en la obra, es aconsejable buscar siempre condiciones de humedad parecidas a la natural que no se aparten mucho de la óptima para que el proceso de compactación que vaya a usarse sea más eficiente.

En laboratorio el contenido de agua tiene especial influencia en las compactaciones que se hagan con una cierta energía, a humedades menores a la óptima, para ello se espera que los pesos volumétricos secos que se obtengan sean mayores cuando los contenidos originales de agua sean menores.

- La reutilización del suelo para compactar. En laboratorio es común es usar la misma muestra de suelo para la obtención de puntos sucesivos de las pruebas de compactación lo que implica una continua recompactación del mismo suelo. Esta práctica es inconveniente debido a que se ha demostrado, que si se trabaja con suelos recompactados los pesos volumétricos que se obtienen son mayores que los que se obtienen con muestras vírgenes en igualdad de circunstancias, de modo que con suelos recompactados la prueba puede dejar de ser representativa.
- La temperatura. La temperatura ejerce un papel importante en los procesos de compactación de campo, en primer lugar, por el efecto de evaporación del agua suministrada al suelo en campo o la condensación de la humedad en el ambiente.
- Otros factores. Existen más variables que afectan a las pruebas de compactación en laboratorio y en campo, tales como el número y espesor de las capas que se dispone o se tiende el suelo, el número de pasadas del equipo mecánico o de compactación sobre cada punto o el número de golpes del pisón compactador en cada capa, etc.

Curva de compactación.

Los procesos de compactación comenzaron a desarrollarse en el campo como técnicas de construcción. Fue hasta que se trató de estudiar de un modo más riguroso los efectos de tales técnicas y establecer los procedimientos de control de calidad y verificación de resultados en el campo cuando nacieron las pruebas de compactación de laboratorio, con base en unas series de pruebas que se desarrollaron por ir logrando en el laboratorio mayor acercamiento a los procesos de campo, que paralelamente se ampliaron desarrollando una serie de equipos producidos para una tecnología cada vez mas conocedora y exigente.

Proctor vio una correlación entre los resultados de un proceso de compactación y el aumento del peso volumétrico seco del material compactado, y estableció la costumbre que aun hoy se sigue, de juzgar los resultados de un proceso de compactación con base en la variación del peso volumétrico seco que se logre también comprendiendo el papel fundamental que ocupa el

contenido de agua del suelo en la compactación que de él se obtiene con un determinado procedimiento.

Se representa la marcha del proceso de compactación por medio de una gráfica en la que se haga ver el cambio de peso volumétrico seco al compactar al suelo con diversos contenidos de agua, utilizando varias muestras del mismo suelo, cada una de las cuales proporciona un punto de la curva. En diferentes procesos de compactación producen al mismo suelo compactaciones distintas, un mismo suelo podrá tener distintas curvas de compactación, correspondiente a los diferentes modos de compactarlo que puedan usarse, sea en campo o en el laboratorio. La curva muestra un máximo absoluto, alguna vez seguido de otro secundario, de menor valor. El peso volumétrico seco correspondiente al máximo absoluto recibe el nombre del peso volumétrico seco máximo, la humedad con la que tal máximo se consigue se denomina humedad óptima y representa el contenido de agua con el cual el procedimiento de compactación que se esté usando produce la máxima eficiencia, por lo menos si esta se juzga por el peso volumétrico seco que se logre, puede construirse ya sea en el laboratorio o en campo, a partir de una pareja de valores $w - \gamma_d$, los cuales se pueden obtener, como ya se dijo, si se aplica el procedimiento de compactación de que se trate a diversos especímenes del mismo suelo con diferentes contenidos de agua la curva de compactación entonces podrá dibujarse a partir de los valores que resultan de la fórmula:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{1 + w}$$

La condición de un suelo compactado en circunstancias normales es la de un suelo no saturado, razón por la cual la curva de compactación se desarrolla por debajo de la curva de saturación, si se comparan las dos se podría determinar cual tendría que ser el contenido de agua que saturaría a una muestra que se compacta a determinado peso volumétrico. La curva de saturación se puede obtener si se calculan los pesos volumétricos secos que corresponden al mismo suelo, saturado con el contenido de agua correspondiente a una cierta abscisa de la curva, aplicando la fórmula:

$$\gamma_d = \frac{S_s}{1 + w S_s} \gamma_w$$

Que corresponde a suelos saturados y cuya obtención es sencilla. Las curvas de compactación que se obtienen en el laboratorio se realizan en pruebas en el que el espécimen se compacta por capas dentro del molde y por medio de golpes aplicados por un pisón estándar, con una energía también prefijada.

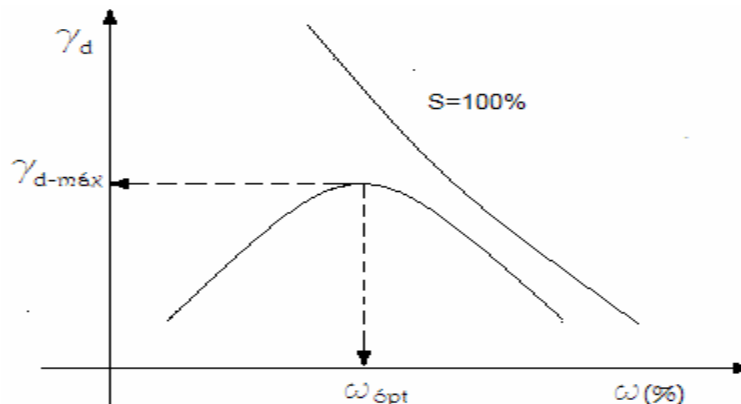


Ilustración 1 Curva de compactación

Humedad óptima y peso específico seco máximo

Los ingenieros de gran parte del mundo han estado familiarizados con las expresiones de humedad óptima y peso específico seco máximo, los cuales son mal entendidos y es común ver que muchos los mantengan como si fueran constantes básicas fundamentales de los suelos, así como las constantes físicas tales como la constante gravitacional o la velocidad de la luz. Es evidente que se trate de conceptos relativos variables, que pueden variar con el método que se utilice para compactar el suelo, además de otros factores que pueden alterar la compactación.

Para dar una clara descripción de la variación del peso específico seco máximo y de la humedad óptima con el método de compactación, los resultados obtenidos en varios suelos, que va desde la roca triturada que pasa la malla número 4 hasta arcillas limosas. Estos suelos se estudiaron según varios procedimientos de compactación que incluyen el Proctor, el Proctor modificado, el método de compactación por impacto de california. Todos estos métodos compactan al suelo por impacto de un pisón, existen en el peso y caída libre del pisón, así como el número y espesor de las capas de suelo. Es evidente que hay diferencia entre los pesos específicos secos máximos obtenidos por estos métodos que son estándar en algunos laboratorios. También que al procedimiento que da a los mayores pesos específicos secos máximos corresponde una menor humedad óptima, la humedad óptima es una variable que depende de la energía de compactación. En el campo de la humedad óptima es una variable que depende del tipo y peso de los rodillos usados en la compactación.

Los resultados obtenidos muestran diferencias del orden de 10% para arena limpia y del 5% para arena limosa en los pesos específicos secos máximos. Las gravas arenosas se compactan fácilmente al peso específico seco especificado con unas cuantas pasadas de un rodillo neumático y a veces con el paso del equipo usual de construcción, mientras que los suelos arcillosos y limosos sujetos a numerosas pasadas de los rodillos no llegan en ocasiones a compactarse al peso específico seco especificado para una obra dada. Es evidente también decir que los resultados obtenidos en la práctica que el acomodo de las partículas del suelo se logra por el impacto en el espacio confinado del molde en el laboratorio no es, necesariamente, el mismo que producen los rodillos lisos o los rodillos neumáticos en el campo, en que el suelo no está confinado. Mientras que algunos procedimientos de laboratorio que producen compactaciones similares a las de campo en ciertos suelos, ningún método, duplica en forma completa la compactación lograda en todos los tipos de materiales.

Se podría hacer una relación de los resultados de compactación de cada una de las pruebas realizadas y compararlas con el grado de compactación que se puede lograr a obtener en campo, es probable que cuando se especifique un grado de compactación en una prueba de compactación estándar modificada, el peso volumétrico seco resulte en un porcentaje más elevado a una prueba de compactación AASTHO estándar en algunos tipos de suelos, mientras que en otros corresponda a un porcentaje total. Estas diferencias son importantes de conocer ya que se tiene que tener un control de la compactación de la obra en ejecución. Cada vez es más notoria la importancia de la compactación dado el desarrollo de nuevas maquinarias de compactación y se han empezado a especializar maquinaria de compactación como lo son los rodillos lisos y neumáticos cada vez más pesados, además de los rodillos segmentados o los vibratorios, todo esto para evitar más pasadas de los equipos para así ahorrar en costos de combustibles y horas de trabajo para conseguir la compactación requerida.

El grado de compactación se puede aumentar con la energía que le imprima en un procedimiento particular, pero esto no quiere decir que sea más eficiente que otro, puede ser que cuando se varié el método de compactar este distribuya mejor la cantidad de energía imprimida al suelo, lo que puede darnos una mejor calidad en el comportamiento del suelo compactado.

Cabe destacar que mientras nos preocupe el controlar el peso específico seco, se puede llegar a descuidar lo que es realmente importante, que es la estructuración del suelo compactado. En algunos casos se puede obtener una adecuada estructuración del suelo con una ligera compactación, mientras que en algunos otros esta estabilidad puede ser inadecuada, aunque se haya realizado un fuerte proceso de compactación y sobretodo se haya llegado a la compactación especificada, aun cuando se tenga un porcentaje del peso específico seco máximo de un método de laboratorio.

El aumento de la compactación lo que nos provoca pesos volumétricos secos mayores puede ser perjudicial, que depende mucho del tipo de suelo que se tenga, también de su contenido de agua y el grado de compactación que se desea alcanzar. Los conceptos de humedad óptima y peso específico máximo dependen mucho de las condiciones y especificaciones del suelo estén claramente definidas desde el inicio. Una sobrecompactación puede ser muy riesgosa, lo que puede provocar un mal comportamiento del suelo en sus características mecánicas, un claro ejemplo es el tezontle, que es utilizado frecuentemente cuando se desea emplear un material ligero, que al ser compactado después de un cierto límite, el material empieza disgregarse que empieza a generar una gran cantidad de finos que llegan a ser contrarios a la necesidad de resistencia, en casos de limos y arcillas que son expansivos es riesgoso cuando se compactados fuertemente en climas muy húmedos ya que estos pueden llegar a tener una expansión masiva.

La compactación es un tratamiento mecánico que se emplea principalmente en campo con el fin de tener que mejorar sus condiciones de resistencia, compresibilidad y esfuerzo-deformación además de evitar los ataques de agentes de intemperismo, para que, cumpla con los requerimientos necesarios que se necesiten para cada caso particular de construcción.

Suelos cohesivos y friccionantes.

Para entender la formación de los suelos que podemos encontrar en campo, los suelos han sido originados por los agentes de intemperismo y desintegración, de los cuales la temperatura, la humedad y la vegetación han sido determinantes en la descomposición de los minerales que integran las rocas subyacentes, dando origen a suelos cohesivos arcillosos y limosos, y suelos friccionantes como gravas, arenas y limos inorgánicos.

Los equipos que se utilizan para la compactación de suelos puramente friccionantes que son las arenas y las gravas arenosas abarcan una gran parte de tipos y procedimientos para compactarlo, donde se pueden utilizar equipos vibratorios, que son los más recomendables en este tipo de suelos, hasta llegar a plataformas vibratorias donde se compactan extensiones mayores de terreno y con una mejor eficiencia, donde se ha tratado de introducir un efecto de rodamiento en los compactadores vibratorios, pero no se ha visto la ventaja del uso de este equipo con respecto a otros que solo son de vibración, además que su costo es más elevado y no marca gran diferencia en la compactación. La problemática de compactar arenas se puede disminuir inyectando agua a presión en un procedimiento llamado vibroflotación donde se combina con un equipo vibratorio, donde el objetivo principal del uso del agua es que se desprenda una gran cantidad de finos que

llenen los huecos entre las arenas aumentando su compactación general y permitiendo un mejor acomodo del suelo.

Para suelos cohesivos como masas de arcillas, el uso de rodillos son la mejor opción para las concentraciones de presiones y el modo de amasado para poder disgregar los grumos para la compactación adecuada de estos materiales. Esta práctica de compactación es tomada de prácticas antiguas apoyadas con la tecnología para poder utilizar maquinaria en lugar de objetos manuales y fuerza animal.

La compactación realizada por cada uno de los equipos utilizado es notable a simple vista, además depende del número de pasadas de los equipos empleados para obtener un tipo de un peso específico seco. En las primeras pasadas de la maquinaria, la compactación crece muy rápidamente, pero cuando el equipo ha pasado varias veces el efecto disminuye, esto reflejado en lo económico ya no es redituable que el equipo mecánico pase varias veces sobre el material tendido porque ya la compactación no es significativa, en pocas palabras no conviene operar en demasía el equipo para conseguir el peso específico seco.

En campo el número de pasadas que son las recomendables para que sea suficiente la compactación fluctúan entre 5 y 10 pasadas sobre el material tendido, dependiendo del material que se tenga, según cada caso particular.

El número de pasadas esta también influido por el tipo de equipo que se utilice para obtener un peso específico seco, un equipo de compactación pesado lograra más rápido el efecto de compactación deseado que otro más ligero. En la actualidad la tendencia es la utilización de equipos pesados para reducir el número de pasadas y economizar en la utilización de equipo de compactación.

Los requisitos que se tendrán en la compactación en campo tienen que basarse sobre un peso volumétrico seco de proyecto, que se obtiene en laboratorio, realizadas sobre un material determinado y con los resultados obtenidos se tendrá la compactación que se logrará con un determinado equipo de compactación y del contenido de agua natural del material en el banco del que se extraiga. El material se tendrá que compactar con la humedad óptima corresponde al peso volumétrico deseado obtenido del laboratorio. Puede ser que se tenga que agregar agua al material en el banco para poder llegar a la humedad óptima, aunque también en ocasiones se tenga que poner a secar el material por exceso de la misma, dejando secar a la intemperie un periodo de tiempo después de extraerlo. Pero para poder llegar a las condiciones idóneas para la compactación son complicadas debido a la acción del clima haciendo que se sujete a ciertas holguras en cuanto a la humedad cercana a la óptima.

Resulta lógico esperar que en campo no se logre el peso volumétrico seco máximo que den en el laboratorio. El grado de compactación es la relación en porcentajes, entre el peso volumétrico que se obtiene en la obra y el máximo especificado que se obtiene de laboratorio. El control que se tiene en obra se lleva al cabo investigando la compactación en el material ya compactado y estableciendo un parámetro aceptable que se determina en importancia y la función que va a desempeñar la obra en cuestión. Al material que se le va aplicar la compactación se deposita en capas por lo general de entre 10 a 30 cm.

Para determinar el grado de compactación se puede determinar por la fórmula siguiente:

$$G_c(\%) = 100 \frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}}$$

Donde:

γ_d = peso volumétrico seco del material tal como ha sido compactado en obra

γ_{dmax} = máximo peso volumétrico seco obtenido según un cierto procedimiento de compactación de laboratorio.

1.2 Compactación mecánica.

Antes de ver los diferentes equipos utilizados en la compactación mecánica, tendremos que entender cómo se distribuyen los esfuerzos en un suelo bajo una carga, donde es la teoría de Boussinesq la que mejor lo explica.

Pondremos un ejemplo para la ilustración de esta teoría. Si se toma un área “A” de terreno de un suelo determinado y se le aplica una carga “P” se forman unos bulbos de esfuerzos como se ilustra en la ilustración 2.

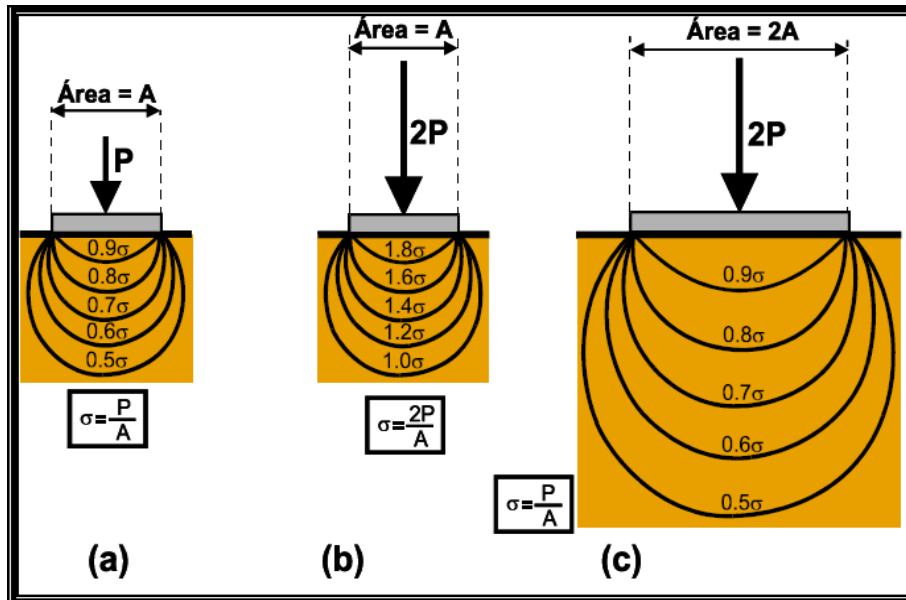


Ilustración 2 Distribución de esfuerzos en un suelo

Si se aumenta la carga al doble, es decir 2P, sin que se altere las dimensiones del área, los esfuerzos aumentan al doble como se puede observar en la figura 1, lo que puede ocasionar fracturas en las partículas del suelo variando grandemente su granulometría, además no se incrementa la distribución de esfuerzo esquematizadas por las semicircunferencias, lo que se concluye que no es conveniente sobrecargar los equipos más allá de las especificaciones de los fabricantes, pues también pueden llegar a dañarse al aplicarles cargas que sobre pasen a las de diseño.

Pero si se aumenta la carga y el área al doble el esfuerzo es el mismo que el primero, pero la profundidad de las distribuciones si aumenta, con lo que se concluye que si se desean capas de mucho mayor espesor deben usarse equipos más pesados y con áreas de contacto mayores.

Se tiene que tener un control en el espesor de las capas para poder suministrar de mejor manera la energía necesaria para poder obtener la compactación requerida en el proyecto, es de vital importancia contar con un estricto control de calidad para garantizar que esta compactación cumplirá con la vida útil de la obra en cuestión.

Se tomará en cuenta que no se podrá aumentar significativamente el espesor de la capa haciendo que se les aplique una carga en demasía a los equipos de compactación, lo que provoque que estos sufran descomposturas.

Para aumentar el espesor de la capa se debe cambiar el equipo de compactación por otro que tenga mayor superficie de contacto, procurando que la presión ejercida también crezca en la misma proporción.

Boussinesq desarrolló la teoría de la distribución de presión para un medio elástico. Para fines prácticos de compactación podemos considerar elásticos a todos los suelos ya que esta teoría es razonablemente cierta aún para suelos granulares.

Hay una gran variedad de equipos de compactación, en diferentes marcas y modelos. Para este trabajo se han clasificado por la energía de compactación que generan de la siguiente manera:

- Rodillos metálicos.
- Rodillos neumáticos.
- Rodillos pata de cabra.
- Rodillos de reja.
- Rodillos de impacto.
- Rodillos vibratorios.
- Rodillos pata de cabra vibratoria.

Rodillo metálico.

Estos equipos transmiten al suelo energía de presión y algo de amasamiento en materiales cohesivos.

Al principio de la compactación al material de la capa es poco resistente y el rodillo se hunde una cierta cantidad con un cierto ancho de contacto, pero conforme el proceso avanza el material aumenta su resistencia por lo que la penetración es menor. Esto tiene dos consecuencias importantes:

Aumenta la presión sobre la capa al reducirse el área de contacto, lo que, como se vio antes, no es conveniente.

Se reduce la profundidad de las distribuciones de presión, por lo que la parte superior de la capa recibe una mayor energía de compactación y comienza a diferenciarse de la parte inferior.

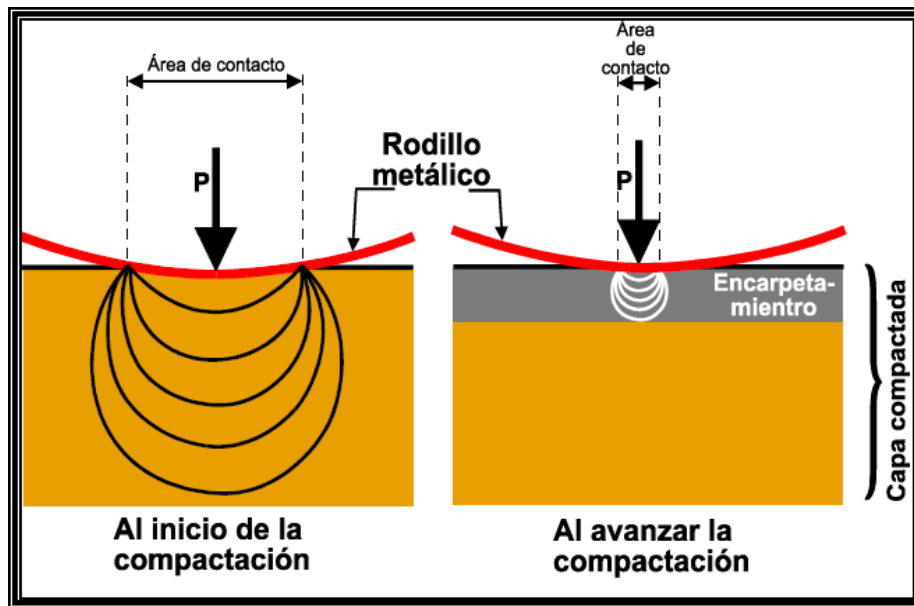


Ilustración 3 Distribución de esfuerzos bajo un rodillo metálico

Si a esto se agrega la costumbre de hacer un riego superficial adicional para compensar las pérdidas por evaporación. Riego que sólo penetra muy poco porque la compactación disminuye la permeabilidad de la capa, en la parte superior de la capa se diferencia aún más y se separa del resto de la capa. Esto se llama encarpetaamiento o porque se manifiesta en pequeños baches llamados “calaveras”. El encarpetaamiento es un defecto grave, por lo cual se tiene que tener una cierta vigilancia sobre el uso de este tipo de maquinaria.

Por estas razones, y por tener rendimientos muy bajos, los rodillos metálicos han perdido mucho campo de acción en grandes movimientos de tierras. Su uso se ha limitado en construcción pesada para dar una primera pasada con objeto de preparar la capa para otros compactadores. Un ejemplo típico es el caso de los compactadores vibratorios que no pueden empezar a compactar cuando el material está suelto y requieren una primera compactación.

Pero ahora hay compactadores vibratorios que pueden trabajar estáticos, por lo que en estos trabajos los rodillos metálicos ya no se usan.

Estos equipos se dividen en dos grandes grupos:

La aplanadora o plancha de tres ruedas que consiste en dos ruedas de tambor paralelas en la parte trasera y un rodillo delantero también de tambor. Los tambores huecos se le pueden cargar. Estas planchas se nombran: 10-12 toneladas, porque sin carga se nombran: 6-8 toneladas, por que pesan 6 toneladas sin carga y 8 toneladas con carga.

La plancha “Tandem”, que tiene dos rodillos de tambor paralelos, uno adelante y otro atrás. Por lo general se nombran: 6-8 toneladas, por que pesan 6 toneladas sin carga y 8 toneladas con carga.

En la plancha el tercer rodillo delantero cubre la franja que van a dejar las ruedas traseras y en la plancha tandem los rodillos cubren la misma franja. Además el peso se reparte de tal manera que a cada rueda o rodillo le llegue una fuerza proporcional al área de contacto que cubre cada una. Esto es con objeto que a cada centímetro cuadrado de la capa le sea transmitida igual energía de compactación.

Estos equipos no se deben cargar, aunque se hace con cierta frecuencia, pero no deberían, porque lastrados aumentan el encarpentamiento.



Ilustración 4 Rodillo compactador Cat Cb-534d Xw

Rodillos neumáticos.

Los rodillos neumáticos son muy eficientes y a menudo esenciales para la compactación de sub-bases, bases y carpetas, sus distribuciones de presión son semejantes a los de los rodillos metálicos, pero el área de contacto permanece constante por lo que no se produce el efecto de reducción de distribuciones de presión.

Estos compactadores pueden ser jalados o auto propulsados y también pueden dividirse en dos tipos, en llantas grandes y pequeñas.

Los compactadores de llantas pequeñas pueden balancearse de dos en dos, lo que permite compactar áreas bajas o pequeñas, lo que no pueden realizar los rodillos metálicos.

Este compactador está diseñado con un traslape entre las llantas delantera y traseras por lo que uno de los eje se tiene un número impar de neumáticos que generalmente es el delantero y en el otro eje trasero un número par, ya en general el número de llantas que tiene el compactador es impar.

Tiene dos ejes tándem y el número de llantas totales que puede tener el compactador varían entre 7 y 13 llantas. La posición de las llantas está conformada de tal manera que las llantas

delantera se traslapan con las traseras y el peso total que se tiene del compactador se reparte de tal manera que cada neumático soporta la misma carga. Este arreglo permite transmitir mejor la energía de compactación sobre el suelo tendido que se tenga.

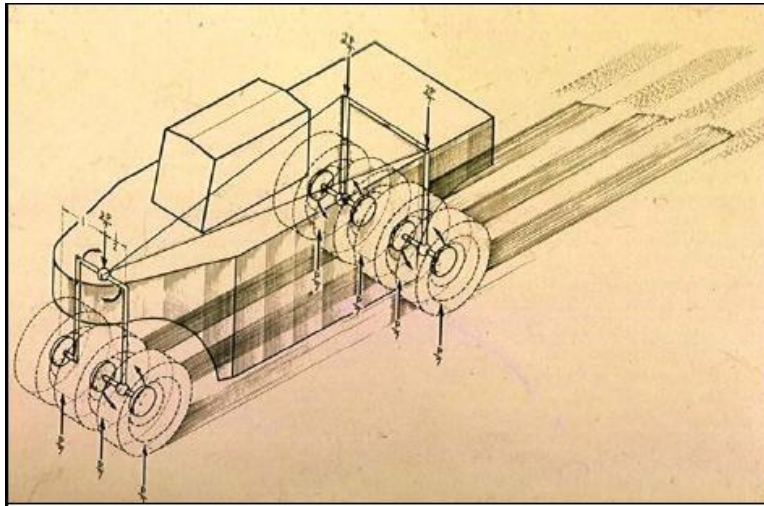


Ilustración 5 Distribución de los neumáticos bajo el rodillo neumático

Este tipo de compactadores tiene una presión de contacto semejante a la de equipos de mayor peso, tienen una excelente maniobrabilidad, tienen poca profundidad de acción y poca flotación en materiales sueltos. Tienen una buena acción de secado y cierran la textura del material en la capa compactada.



Ilustración 6 Compactador neumático Carterpillar PS360B

Los compactadores neumáticos de llantas grandes son generalmente arrastrados por un tractor sobre neumáticos y pesan entre 15 y 20 toneladas. Tienen 4 ó 6 llantas en un mismo eje. Son, por su peso, difíciles de maniobrar y de transportar, por lo que su aplicación se debe limitar a aquellos trabajos de poca pendiente, de tramos rectos, largos y de fácil acceso, generalmente en aeropuertos. Por estas razones están siendo desplazados por otros equipos más ligeros y versátiles.

Los factores más importantes que intervienen en el trabajo de compactadores neumáticos son:

Peso total que depende del número total de llantas y del sistema de suspensión del compactador se puede conocer el peso o fuerza aplicada por llanta. A mayor peso total, mayor carga por llanta, en caso de tratarse de una suspensión isostática.

La presión del inflado es importante, pero está ligada íntimamente a la carga de la llanta. Dependiendo del peso del compactador, y la presión de contacto

Podemos observar que si aumentamos el peso sin aumentar la presión, aumentamos la profundidad de la distribución de las presiones en las circunferencias, pero no aumentamos la presión, éstos nos permitiría trabajar capas relativamente mayores, pero el aumento de eficiencia es casi nulo, y las llantas durarán menos pues estamos aumentando el trabajo de deformación de la llanta.

Si aumentamos la presión sin aumentar la carga disminuimos la profundidad de la distribución de presión, y podemos llegar a encarpetar la capa. Esto puede ser eficiente si la capa es delgada como suele serlo en bases, sub-bases y carpetas.

Si aumentamos el peso y la presión, estamos aumentando la presión efectiva sobre la capa y por lo tanto el trabajo de compactación sobre la capa, sin embargo esto nos puede disminuir la vida útil de las llantas y del equipo, y aumentará la tendencia al rebote.

En el concepto moderno de un compactador neumático la carga sobre la llanta y la presión de inflado, deben ser las adecuadas para dar la presión de contacto suficiente para ejercer el esfuerzo requerido de compactación. Es aconsejable no alejarse mucho de las recomendaciones del fabricante.



Ilustración 7 Compactador neumático de llantas grandes

Rodillos pata de cabra.

Estos compactadores se diferencian por que concentran su peso en un área relativamente pequeña de todo un conjunto de puntas de diferente forma ejerciendo presiones estáticas al suelo muy grande en los puntos donde las puntas penetran el suelo. Conforme el equipo va dando pasadas al suelo tendido, el material se va compactando, las puntas dejan de profundizar más en el suelo hasta que deja de producirse alguna compactación adicional al suelo, en una profundidad de 6 cm la superficie queda distorsionada pero se compacta bajo la siguiente capa que se tienda.

En la ilustración 8 se muestra la influencia sobre el suelo la compactación obtenida ejerce la forma de la punta de del vástago, que constituye al equipo denominado pata de cabra, se muestra la distribución de las presiones en el suelo tendido, donde penetra y la distribución de la energía aplicada es pequeña.

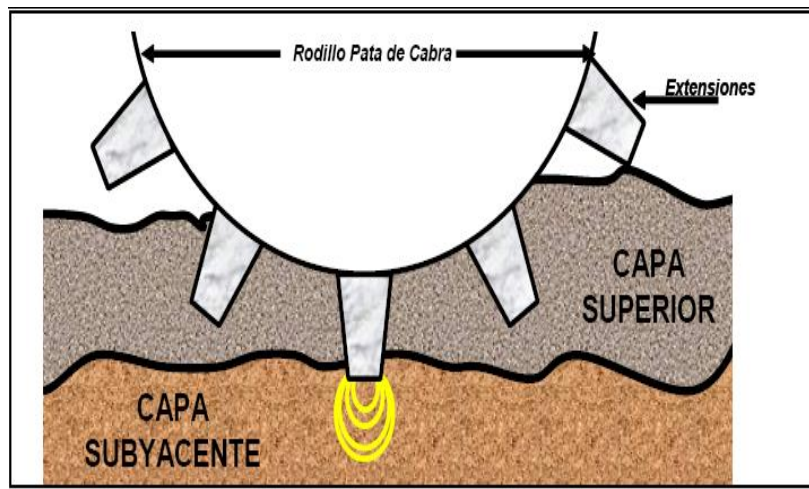


Ilustración 8 Distribución de presiones en un rodillo pata de cabra

En estos casos todos los vástagos aplican la misma presión a lo largo del tiempo. La máxima eficiencia se alcanza cuando la punta plana de la extensión está en contacto con el suelo a compactar.

La presión que ejerce el rodillo pata de cabra al pasar sobre sus extensiones sobre el suelo no es uniforme, los vástagos penetran ejerciendo presiones crecientes, las cuales llegan a un máximo en el instante en el que el vástago está en vertical y en su máxima penetración, a partir de ese momento la presión disminuye hasta que el vástago sale completamente, la acción del rodillo es tal que hace que la compactación se realice de abajo hacia arriba, en las primeras pasadas las extensiones penetran con una parte del tambor en el suelo lo que permite una mayor presión se ejerza sobre el lecho inferior del suelo a compactar, por lo tanto, la capa no tiene que ser mayor a la longitud del las extensiones del rodillo pata de cabra. A esta forma de compactar se le denomina acción de amasado y en laboratorio ha sido tomada en cuenta a fin de lograr una mayor representatividad en pruebas que se realizan en suelos que se compactan con rodillos pata de cabra.

Los equipos mas usuales tienen vástagos de 20 a 25 cm de longitud y se usan para compactar capas de suelo de alrededor de 30 cm de espesor. Al aumentar el número de pasadas de estos equipos de compactación, la parte inferior de la capa va adquiriendo mayor resistencia, lo que va impidiendola entrada de los rodillo.

Este proceso puede llegar a un límite donde el rodillo camine sobre el suelo, pero sin que haya contacto del tambor con el tambor y el suelo, podría decirse que éste es un límite como norma sencilla para indicarnos que la capa compactada esta lista.



Ilustración 9 Rodillo pata de cabra

Se considera una operación adecuada cuando el vástago penetra de 20 a 50% de su longitud, lo que depende la plasticidad del suelo, el rodillo produce dos resultados muy deseables en terraplenes de suelos finos compactados, que son una distribución uniforme de energía de compactación en cada capa y buena liga entre capas sucesivas.

Con el uso de este equipo de compactación, todo incremento de energía de compactación hace que aumente el peso volumétrico seco máximo y disminuya el contenido de agua óptimo.

Se hace importante analizar otro aspecto importante de la compactación con rodillos pata de cabra. Se trata de presentar el efecto de número de pasadas de un rodillo para diferentes tipos de suelos.

Puede verse que disminuye el incremento de los pesos volumétricos secos por pasada al aumentar la plasticidad, y que el número de pasadas adecuadas depende del tipo de suelos que se tenga en cada caso.

Rodillo de rejilla.

Este compactador fue desarrollado originalmente para disgregar rocas poco resistentes a la compresión, como rocas sedimentarias y algunas metamórficas, para hacer caminos de penetración transitables todo el año, para esto el rodillo transita sobre la roca suelta en el camino, rompiéndola y produciendo finos que llenan los vacíos entre los materiales más gruesos formando una superficie estable. La roca que se puede escarificar también se puede disgregar.

La disposición de la reja es tal que no forma exactamente un cilindro, sino en realidad las crestas de la reja son una serie de puntos altos y bajos dispuestos como un tablero de ajedrez, como se muestra en la figura 7, lo que produce un rodamiento no uniforme y un efecto de impacto. Cuando estos rodillos trabajaban a alta velocidad, En compactación 20 km/h es alta velocidad, producen un efecto de amasamiento sobre la capa compactada.

Al ser usado este equipo se encontró que era capaz de compactar eficientemente una gran variedad de suelos por la combinación de energías de impacto y vibración.

Tienen la desventaja de que tienden a atascarse por dentro en materiales finos, lo que reduce un poco su eficiencia por la necesidad de limpiarlos frecuentemente.

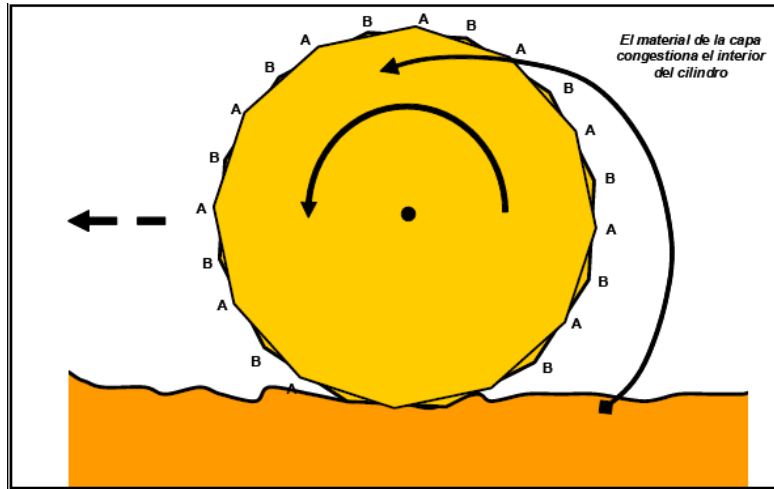


Ilustración 10 Distribución de puntos altos y bajos en el rodillo de rejilla

Son muy buenos compactadores pero tiene el problema que el acabado de la capa que compactan es pésimo, por lo que su uso se ha limitado al cuerpo de los terraplenes y como éstos generalmente están formados por materiales cohesivos, se ha incluido este equipo sólo para materiales finos, aunque sean capaces de compactar toda clase de suelos.

El rodillo de rejilla tiene una cuadrícula de 8.9 por 8.9 cm, su peso bruto varía de 2.82 toneladas a 6.87 toneladas, lastrado totalmente, está provisto con 4 cajas metálicas para lastrarlo es remolcado por un tractor.

Rodillo de impacto

A causa de los problemas de limpieza del rodillo de reja, se diseñó un nuevo rodillo usando el mismo principio, el rodillo de impacto. Este es un rodillo metálico, en el que se han fijado unas salientes en forma aproximada de una pirámide rectangular truncada como se muestra en la ilustración 12.

Estas pirámides no son de la misma altura pues hay unas más altas que otras, siguiendo el modelo de puntos altos y bajos del rodillo de reja, esto da las mismas ventajas, pudiéndose limpiar fácilmente por medio de dientes sujetos a un marco.

Estas salientes han sido diseñadas de tal manera que el área de contacto se incremente con la penetración, ajustándose automáticamente la presión a la resistencia del suelo compactado donde la distribución de energía no es la misma en toda la superficie, dependiendo de los vástagos que hacen contacto con el suelo por lo que se dijo anteriormente las diferencias de alturas de los vástagos.

El diseño contempla también una fácil entrada y salida a la capa, lo que disminuye la resistencia al rodamiento y permite como en el caso del rodillo pata de cabra una ventaja de adherencia entre las capas.

Estos rodillos han probado ser muy eficientes y eliminan estratificación en los terraplenes, esto es importante en corazones impermeables de presas, sustituyendo totalmente a la pata de cabra.

El rodillo de impacto ha probado ser uno de los más versátiles y económicos compactadores en terracerías, capaz de compactar eficientemente la mayor parte de los suelos.

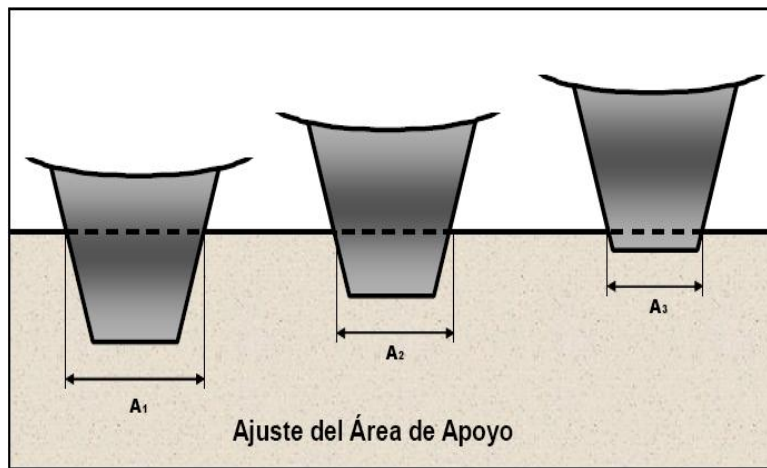


Ilustración 11 Altura de penetración de los vástagos del rodillo de impacto

Como se muestra en la ilustración 11 donde se ilustra la forma de las diferentes alturas de vástagos que al entrar en contacto con el suelo, las áreas de apoyo se van disminuyendo conforme gira el tambor haciendo que los vástagos más largos penetren más profundo que los más cortos.

Estos compactadores son autopropulsados y han demostrado ser muy eficientes y económicos para toda clase de suelos generando amasamiento e impacto. Sin embargo, el acabado de la capa, igual que el rodillo de reja es pésimo, por lo cual sólo se limita a materiales cohesivos.



Ilustración 12 Rodillo de impacto Tamping roller

Rodillos vibratorios.

La compactación por vibración se emplea Rodillos que proporcionan un efecto vibratorio al elemento compactador, la frecuencia de vibración tiene una gran influencia en el proceso de compactación y su intervalo de variación óptima puede comprender el rango de 0.5 y 1.5 veces la frecuencia natural del suelo, lo que lleva al aparato a frecuencias de 1500 a 2000 ciclos por minuto.

Los factores que influyen en los resultados del rendimiento del equipo son los siguientes:

- La frecuencia que puede alcanzar el oscilador por minuto
- La amplitud, que puede ser cuantificada por una distancia vertical en casi todos los equipos del mercado
- El empuje dinámico que se genera con cada impulso del oscilador
- La carga muerta, el peso del equipo de compactación, es decir, todo lo demás sin considerar el oscilador
- El área que abarca el compactador en el suelo
- La estabilidad del rodillo

Cuando se requiere compactar por vibración para que se obtenga la máxima eficiencia de compactación, el contenido de agua debe de ser menor al óptimo, que el que puede requerirse para otro tipo de compactación.

Una de las ventajas de trabajar con equipos de vibración es la poder tener capas de mayores espesores que en las que pudieran ser con otros compactadores, esto hace que nuestro rendimiento aumente y los costos de operación disminuyan. Por ejemplo la compactación de suelos de gradadas bien y mal graduadas se pueden compactar fácilmente en capas de 60 cm de espesor y con el uso de otros rodillos se tendrían que tener capas de 20 a 30 cm de espesor.

Los procesos de compactación en campo se combinan con la presión para vencer nexos entre partículas que se producen en suelos gruesos como en los suelos finos, ya que el efecto de vibración es muy poco efectiva.

La vibración en suelos gruesos es conveniente porque reduce en forma considerable la fricción interna del material, la presión estática debe vencer esta fricción, para que se evite el deslizamiento del suelo por el aumento de una presión normal. Con el uso del rodillo vibratorio en un suelo friccionante, este sufre una orientación de las partículas en el momento en que tienden a separarse y una fuga de las partículas más finas, hacia los huecos de las partículas más grandes.

En la compactación por vibración se han llegado a tener resultados de reducción de la fricción, han llegado a ser 15 veces en arenas y 40 en gravas, a este factor también se le suman la presión del compactador ejercida con su carga de compresión y esfuerzo cortante, con las que mejoran el acoplamiento entre las partículas y aumentan el relleno de huecos, reducen las fuerzas de tensión capilar que pueden existir entre granos.

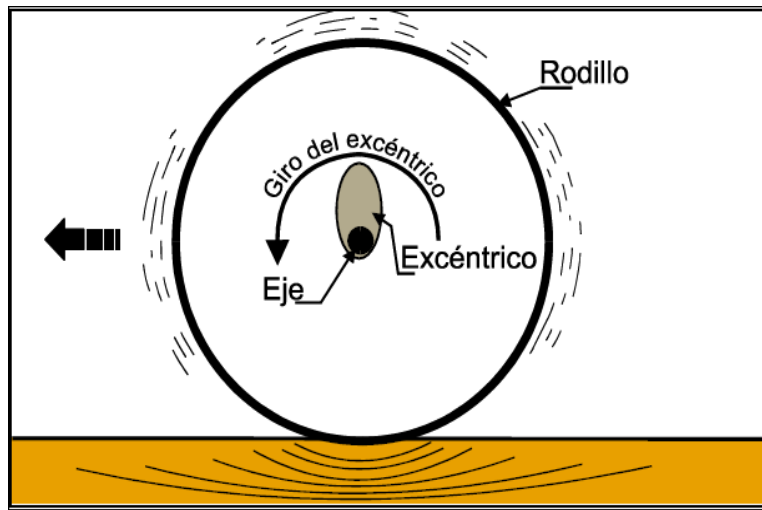


Ilustración 13 Funcionamiento de un rodillo vibratorio

Cuando se compacta un suelo que es muy grueso, se hace que sea propicia la salida de agua durante la vibración, si el agua fuera una cantidad importante. En resumen de que las gravas y los fragmentos de roca podrán compactarse exitosamente con contenido de agua muy bajos.

Si el suelo es de arena y grava que contiene una cantidad considerable de finos y su contenido de agua es alto, la compactación por vibración puede dificultarse. Para tener una mejor compactación por el método de vibración conviene mucho que el contenido de agua no exceda del 10 %.

En suelos finos arcillosos que se compactan por vibración, se tiene una influencia muy grande en los contenidos de agua, por un lado las arcillas poco húmedas requieren grandes energías de compactación y los equipos que tengan que compactar tienen que ejercer grandes presiones.

Este inconveniente hace que el espesor de las capas que pueden manejarse sea mucho menor que el caso de arenas y otros suelos friccionantes, así como la compactación se tenga que darse con equipos pesados pata de cabra o neumáticos, capaces de dar la presión requerida adicional a la vibración.

No están del todo definidos los mecanismos a través de lo que la vibración actúa en arcillas húmedas. Las arcillas húmedas pueden compactarse con energías mucho menores que las más secas y con equipos que ejerzan una presión adicional también mucho menor.

Los limos y los suelos limosos pueden compactarse adecuadamente por métodos vibratorios cuando su contenido de agua es próximo al óptimo y cuando los espesores de capa no sean grandes.



Ilustración 14 Rodillo vibratorio YZ14H

Los hay de dos tipos:

De jalón, que tienen que ser arrastrados por una máquina, generalmente un tractor agrícola y que tiene su propio motor para mover el excéntrico.

Autopropulsados, que pueden estar formados por dos rodillos vibratorios o por una combinación de un rodillo y neumáticos. En este caso el mismo motor proporciona potencia para el desplazamiento del equipo y para la vibración del o los rodillos.

Estos rodillos funcionan disminuyendo temporalmente la fricción interna del suelo. Como en los suelos granulares (gravas y arenas) su resistencia depende principalmente de la fricción interna, en los suelos plásticos depende de la cohesión, la eficiencia de estos rodillos está limitada a suelos granulares.

Estos rodillos se clasifican por su tamaño, pequeños hasta 9000 kg de fuerza dinámica y grandes de más de 9000, pudiendo llegar hasta 20 000 kg o más. Los grandes pueden llegar a sobre esforzar suelos débiles por lo que hay que manejarlos con cuidado.

Todos los vibradores deben de manejarse a velocidades de 2.5 a 5 km/h. Velocidades mayores no incrementan la producción, y con frecuencia no se obtiene la compactación.

Rodillos de pata de cabra vibratoria.

La tecnología actual está desarrollando un gran número de equipos en los que se busca combinar los efectos de dos o más de los sistemas tradicionales, a fin de lograr una especialización de las acciones que garantice un resultado óptimo para cada caso particular.

Los rodillos pata de cabra con aditamentos vibratorios generalmente son de tipo remolcado y se recomiendan para compactar suelos finos arcillosos. Además de otras ventajas que ya se mencionaron su uso permite utilizar mayor espesor de capa.

Este equipo es un rodillo semejante al rodillo liso vibratorio, pero tiene extensiones semejantes a los de la pata de cabra y se hace trabajar en alta amplitud y baja frecuencia, por lo que produce energía de impacto. También, por la acción de las extensiones, produce efecto de amasamiento.

Este equipo compacta también la capa subyacente pero no la capa superior y no estratifica. Aunque es muy eficiente, con altas producciones, el acabado de la capa es pésimo, por eso se recomienda sólo para el cuerpo del terraplén.



Ilustración 15 Rodillo Vibratorio pata de cabra DINAPAC CA250D

Los procesos de compactación en obra son por su naturaleza muy lentos y costosos como para reproducirlo a voluntad, cada vez que se desee estudiar cualquiera de sus detalles, por lo tanto no proporciona un método práctico de una herramienta de análisis, investigación y estudio.

Para desarrollar pruebas de laboratorio que tengan que reproducir fácil y económicamente los procesos que relacionen las técnicas de campo y el conocer más un proceso tan difícil e importante.

Los estudios muestran a las pruebas de laboratorio como base para estudios para proyecto y fuente de información para plantear un adecuado modo de trabajo en campo, resultaría inoperable reproducir la obra a realizar para determinar los posibles comportamientos que se tendrían en la obra.

Las pruebas de compactación de laboratorio solo se justifican en términos de representatividad de los procesos de campo que se producen. Con el propósito de llegar a estudiar detenida y minuciosamente en el laboratorio un proceso que no tiene nada que ver con el proceso de compactación que se realiza en campo que es el que se supone que se reproduce, se podría considerar que tendrían consecuencias graves en cuanto a las acciones prácticas que se adopten, las tendría si no se entendiera en sus justas dimensiones razonables, que el criterio se juzgará como un proceso de compactación a través del laboratorio de manera única o principal.

Se compactan los suelos para obtener datos para proyecto, esta información se refiere a resistencia, deformabilidad, permeabilidad, susceptibilidad al agrietamiento, entre otras. La representatividad de la prueba, en el sentido que se reproduzcan en el laboratorio con un suelo de las mismas propiedades mecánicas que después se obtendrán al compactar los materiales en el campo.

Puede haber otro uso para las pruebas de compactación, para tener un estricto control de calidad, en este caso las pruebas funcionan fundamentalmente como un índice comparativo de pesos volumétricos de laboratorio y de campo, la similitud de las propiedades mecánicas entre ambos es mucho menos importante, siendo por consecuencia una idea de representatividad referente a la prueba.

Existen muchos métodos de compactar suelos en campo, es lógico pensar que no se tendrá una sola prueba con una sola técnica estandarizada, que sea para representarlos a todos. Por lo tanto hay pruebas de compactación de varios tipos. La energía de compactación influye mucho también en los resultados del proceso, y los equipos utilizados en campo la aplican en forma muy variada, de forma que también habrá variantes en las pruebas por este concepto.

Aun cuando otros factores actúan como variables que afectan el proceso de compactación, solo los antes mencionados han sido utilizados para diferenciar pruebas de laboratorio, por lo menos las más comunes.

Las pruebas que se tienen aparecen como sigue aunque solamente nosotros en esta tesis nos enfocaremos en las primeras dos:

- A. Pruebas por impacto o dinámicas
- B. Pruebas por amasado
- C. Pruebas estáticas
- D. Pruebas por vibración
- E. Pruebas especiales.

1.2.1 Pruebas de compactación por impacto.

La mayoría de las pruebas por impacto tienen las siguientes características:

El suelo se compacta por capas en el interior de un molde cilíndrico metálico, variando de unas pruebas a otras el tamaño del molde y el espesor de la capa.



Ilustración 16 Molde Proctor estándar



Ilustración 17 Molde Proctor modificado

En todos los casos la compactación se logra al aplicar a cada capa dentro del molde un cierto número de golpes, uniformemente distribuidos, con un pisón cuyo peso, dimensiones y altura de caída cambian de unas pruebas a otras. El número de golpes del pisón que se aplica por capa también cambia en las diferentes pruebas.

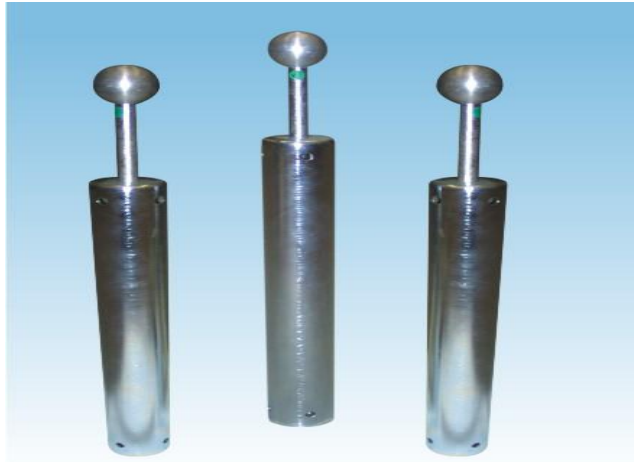


Ilustración 18 Pistón para suministrar la energía de compactación

En todos los casos, la energía específica se puede calcular con bastante aproximación con el empleo de la ecuación:

$$E_e = \frac{Nn Wh}{V}$$

Ya antes mencionada, quedando definida por el número de golpes por capa del pistón compactador, el número de capas en el que el suelo se dispone dentro del molde, el peso del pistón compactador, su altura de caída y el volumen total del molde.

En todos los casos se especifica un tamaño máximo de partícula que puede contener el suelo, y se eliminan los tamaños mayores por cribado previo a la prueba. Es frecuente que se establezca una especificación relativa al reusó del material durante la prueba.

Los valores de cada una de las variables de la prueba pueden hacerse cambiar según convenga, al fin de reproducir las condiciones de compactación que se tengan en campo. Como las propiedades mecánicas de los suelos compactados dependen de las condiciones de compactación, y las propiedades que son deseables para cierta estructura no necesariamente lo son en otra, el uso de un solo patrón de laboratorio para todas las posibles situaciones de campo.

Algunas de las pruebas por impacto que han alcanzado mayor difusión son las pruebas Proctor estándar, que es la que generalmente propuso Proctor, la prueba Proctor (ASTM) estándar, que tienen cuatro variantes, la prueba Proctor (ASTM) modificada, la prueba E-10 del U.S. Bureau of Reclamation, la prueba de impactos de California y la prueba británica estándar.

Algunas de las características principales de estas pruebas se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 2

Características de las pruebas de compactación por impactos de uso más generalizado									
Prueba	Tratamiento del material	Molde		Peso del martillo (kg)	Altura de caída (cm)	Numero de capas	Reúso del suelo	Numero de golpes por capa	Energía específica $\frac{kg\ cm}{cm^3}$
		Diámetro	Altura (cm)						
Proctor estándar	Cribado por la malla ¾"	10.16	12.70	2.490	30.48	3	si	25	4.02
Prueba E-10 del U.S.B.R.	Cribado por la malla número 4, tras secado al aire y desintegración de grumos	10.80	15.24	2.490	35.72	3	si	25	6.05
Proctor (AASHO)estándar	Cribada por la malla numero 4, tras secado al aire	10.16	11.43	2.490	30.48	3	si	25	6.05
Proctor (AASHO) modificada	Secar al aire, se desintegran grumos y se criba por la malla de ¾", reemplazando material retenido con igual peso del material comprendido entre las mallas de ¾" y número 4	15.24	17.78	4.530	45.72	5	no	55	27.31
California tipo A	Cribado por la malla de ¾" en estado seco	7.30	91.44	4.530	45.72	5	NO	20	17.70
Tipo B	Cribado por la malla de ¾" en estado húmedo	7.30	91.44	4.350	45.72	10	no	20	35.40
Británica estándar	Secado al horno o al aire y cribado por la malla ¾"	10.16	11.68	2.492	30.48	3	si	25	6.05
Variante Proctor de SOP	Secado al aire y cribado por la malla número 4	10.16	11.68	2.490	30.48	3	si	30	6.05

Unas de las problemáticas más serias que se han puesto a las pruebas de compactación por impacto estriban que su representatividad se ven afectadas por las condiciones de confinamiento muy rígidas que impone el molde al suelo colocado en su interior, la posibilidad de desplazamiento de las partículas del suelo, haciéndolas distintas que las que se tienen en campo, donde el confinamiento lateral es mucho menor.

Los hechos fundamentales que rigen la compactación de laboratorio en pruebas por impacto, que a energía creciente se obtiene mayor peso volumétrico seco máximo a un contenido de agua menor al óptimo, cuando se tiene un contenido de agua por arriba del óptimo en la compactación tiene repercusión en el peso volumétrico seco logrado, en tanto que debajo del contenido óptimo de agua, es muy considerable el efecto del aumento de la energía de compactación.

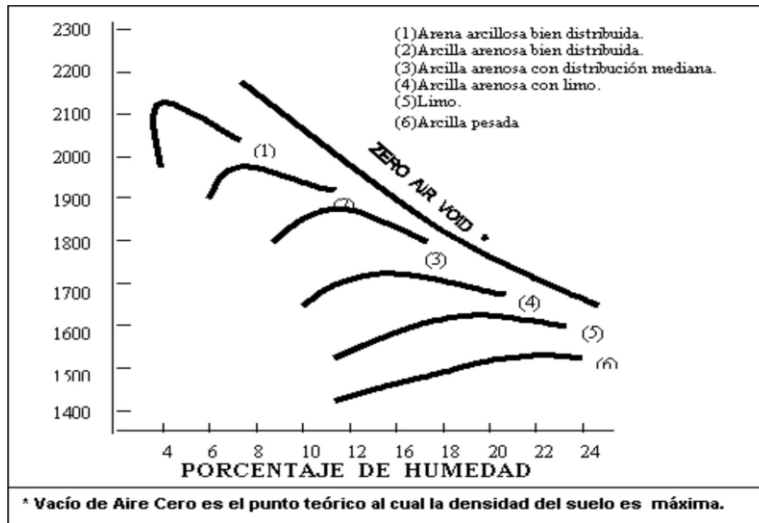


Ilustración 19 Curva de compactación para 6 suelos utilizando la prueba Proctor

Se tiene una gran ventaja de una arena bien graduada, en donde las partículas finas pueden acomodarse entre los huecos de las grandes, en suelos gruesos con contenidos de hasta el 25% de un agregado de un solo tamaño de hasta 2.5 cm, tiene poco efecto la compactación, en porcentajes mayores del mismo tamaño de partículas hacen decrecer con rapidez los pesos volumétricos alcanzados.

Cuando ocurren los máximos cambios de volumen es que se está cerca de la saturación, pero la capacidad de absorber agua decrece cuando también disminuyen los porcentajes de aire en los vacíos.

Las formas de las curvas de compactación obtenidas se consideran regulares cuando se presenta el contorno parabólico como se muestra en la siguiente gráfica donde se relaciona el peso volumétrico seco, el contenido de agua y la curva de saturación, pero muchos suelos de arenas uniformes y ciertas arcillas coloidales altamente plásticas exhiben con frecuencia curvas de compactación de forma muy irregular. La forma de la curva puede también estar ligada a la energía de compactación, por ejemplo, en las arcillas de alta plasticidad, la forma irregular obtenida en las pruebas Proctor estándar suele tornarse muy regular cuando se usa la prueba Proctor modificada.

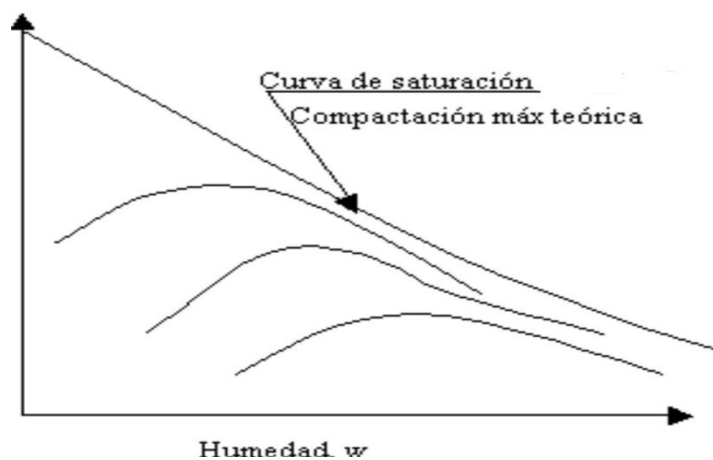


Ilustración 20 Gráfica de compactación máxima y curva de saturación

Para todos los suelos la eficiencia de un aumento de la energía de compactación va disminuyendo a medida que se opera a niveles más altos de energía.

La experiencia de campo indica que en muchos suelos es muy difícil de sobrepasar el 100% de compactación con base en la prueba modificada en tanto que con otros es más fácil lograrlo.

Es claro tomar en cuenta que existe una relación de porcentajes de pruebas de compactación estándar y modificadas, siendo la modificada la que se tome como un 100%, el suelo es el principal factor para definir la relación entre ambas pruebas. Es de consideración los acercamientos que ocurren entre los resultados de las dos pruebas en materias granulares.

Se puede obtener para un mismo suelo grandes diferencias, tanto en peso volumétrico seco máximo como en contenido óptimo de agua, al aplicar diferentes métodos de compactación.

1.2.1.1 Pruebas Proctor

Las pruebas permiten determinar la curva de compactación de los materiales para las terracerías y a partir de estas inferir su masa volumétrica seca máxima y su contenido de agua óptimo. Consiste en determinar las masas volumétricas secas de un material compactado con diferentes contenidos de agua, mediante la aplicación de una misma energía de compactación en una prueba dinámica y, graficando los puntos correspondientes a cada determinación, trazar la curva de compactación del material.

Para tener una clara forma de cómo realizar una prueba Proctor se tuvo que basar en las siguientes normas y manuales.

Materiales para terraplén	N-CMT-1-01
Materiales para subyacente.....	N-CMT-1-02
Materiales para subrasante.....	N-CTM-1-03
Muestreo de materiales para terracerías.....	M-MMP-1-01
Secado, disgregado y cuarteado de muestras.....	M-MMP-1-03
Contenido de agua.....	M-MMP-1-04
Densidades relativas y absorción.....	M-MMP-1-05
Granulometría de materiales compactables para terracerías.....	M-MMP-1-06

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

Los moldes de forma cilíndrica, de volúmenes V y masas W , conocidos, provistos de una placa metálica a la cual se aseguran el cilindro y una extensión o collarín removible con diámetro interior a igual a del cilindro, con la forma y dimensiones indicadas en la figura siguiente dependiendo de la variante de prueba, según lo indicado en la siguiente tabla.

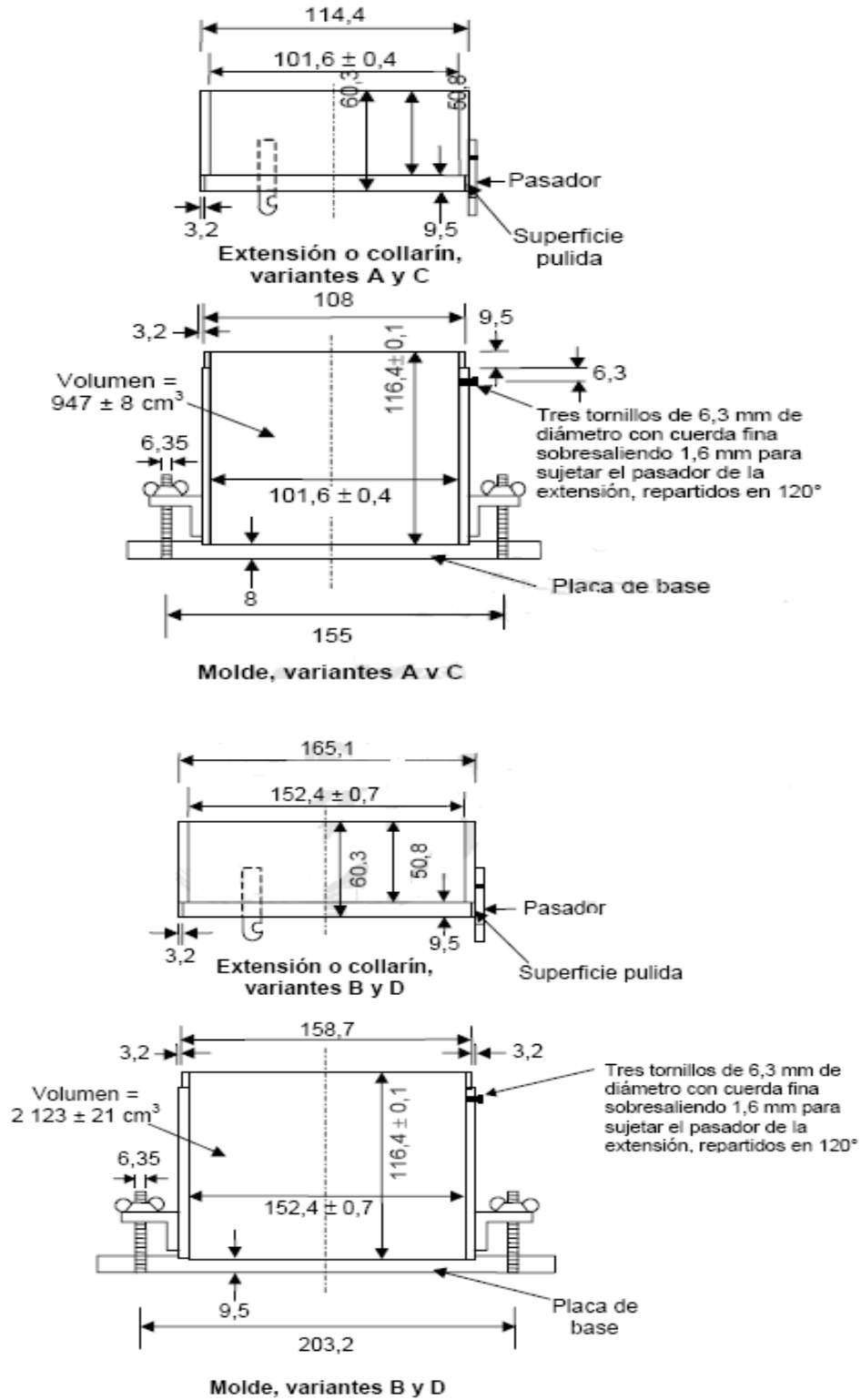


Ilustración 21 Moldes cilíndricos para las pruebas de compactación AASTHO

Los pisones son metálicos, con cara inferior de apisonado circular de 50,8 mm de diámetro, acoplados a una guía metálica tubular, como el mostrado en la ilustración 22 y con las características indicadas en la tabla 3 que se menciona a continuación, de acuerdo con el tipo de prueba de que trate.

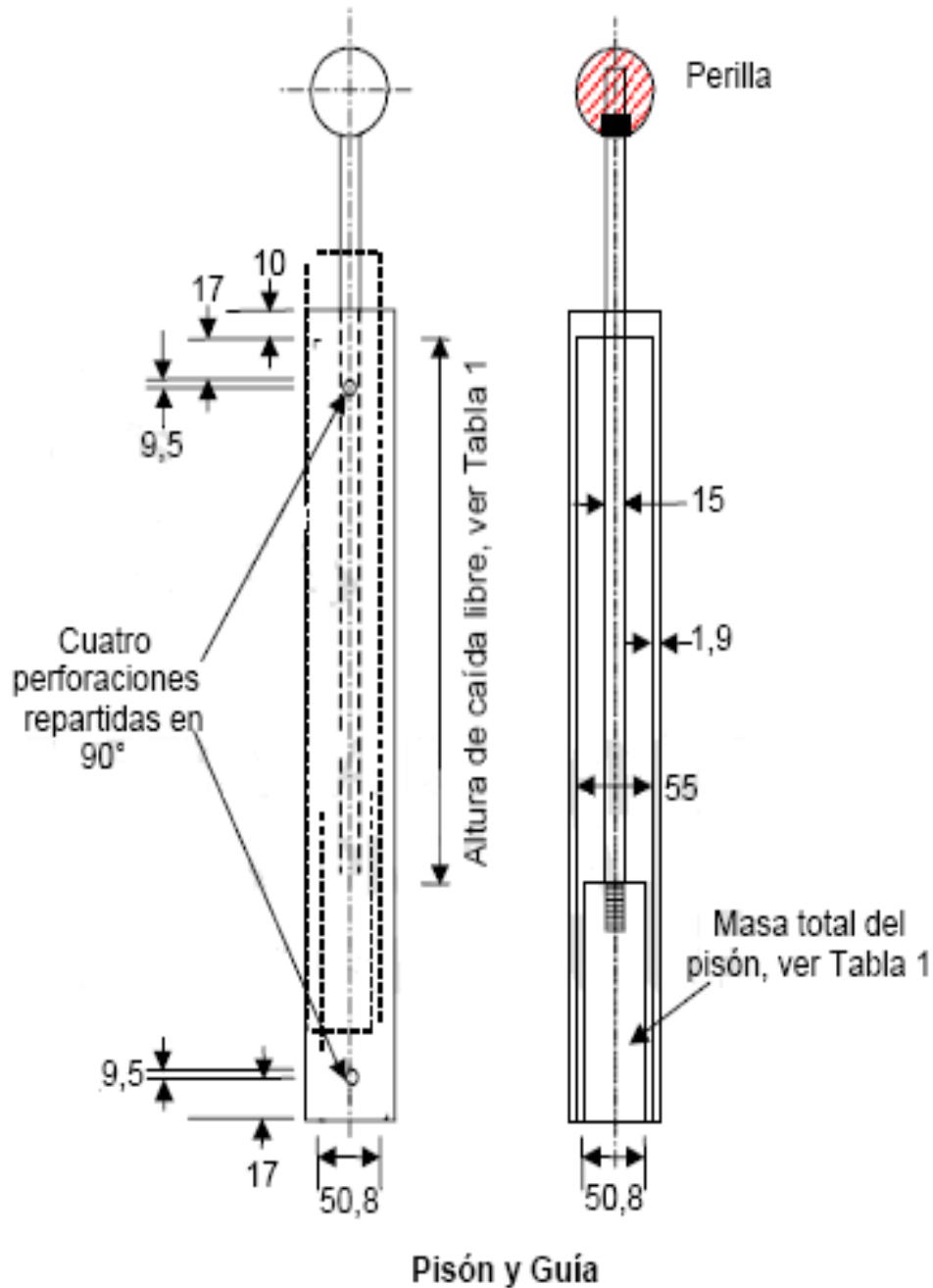


Ilustración 22 Dimensiones de pisones metálicos usados para compactación

Regla

Metálica, de arista cortante, de aproximadamente 25 cm de largo.

Balanza

Una con capacidad mínima de 15 kg y aproximación de 5 g; otra con capacidad mínima de 2 kg y aproximación de 0,1 g.

Horno

Eléctrico o de gas, con capacidad suficiente para contener el material de prueba, con termostato capaz de mantener una temperatura de 105°C y aproximación de $\pm 5^\circ\text{C}$.

Base Cúbica

De concreto o de otro material de rigidez similar con dimensiones mínimas de 40 cm por lado.

Probetas

Una con capacidad de 500 cm³ y graduaciones a cada 10 cm³; otra con capacidad de 1 000 cm³ y graduaciones a cada 10 cm³.

Mallas $\frac{3}{4}$ " y n°4

Fabricadas con alambres de bronce o de acero inoxidable, tejidos en forma de cuadrícula, con abertura nominal de 19 y 4,75 mm respectivamente, que cumplan con las tolerancias indicadas en la Tabla 1 del Manual M·MMP·1·06, Granulometría de Materiales Compactables para Terracerías. El tejido estará sostenido mediante un bastidor circular metálico, de lámina de bronce o latón, de 206 \pm 2 mm de diámetro interior y 68 \pm 2 mm de altura, sujetando la malla rígida y firmemente mediante un sistema de engargolado de metales, a una distancia de 50 mm del borde superior del bastidor.

Cápsulas

Metálicas, con tapa.

Charolas

De lámina galvanizada, de forma rectangular de 40 \times 70 \times 10 cm.

Cucharón

De 20 cm de largo, 11 cm de ancho y 10 cm de altura, formando un paralelepípedo rectangular con sólo cuatro caras, cuya cara menor lleva acoplado un mango metálico de sección circular de 13 cm de largo.

Aceite

Para lubricar las paredes de los moldes.

Variantes de las pruebas

Las pruebas se pueden realizar con una de las siguientes cuatro variantes, según se muestra en la Tabla 3.

Variante A, que se aplica a materiales que pasan la malla N°4 (4,75 mm) y se compactan en el molde de 101,6 mm de diámetro interior.

Tabla 3.- características de las variantes de las pruebas de compactación.

Tipo de pruebas	Estándar		Modificada	
Masa del pisón, kg	2,5 ± 0,01		4,54 ± 0,01	
Diámetro del pisón, mm	50,8		50,8	
Altura de caída del pisón, cm	30,5 ± 0,1		45,7 ± 0,1	
Número de capas	3		5	
Variantes	A y C	B y D	A y C	B y D
Tamaño máximo del material, mm	4,75 (N°4)	19,0 (¾")	4,75 (N°4)	19,0 (¾")
Diámetro int. Del molde, mm	101,6 ± 0,4	152,4 ± 0,7	101,6 ± 0,4	152,4 ± 0,7
Número de golpes por capa	25	56	25	56
Tamaño de la muestra de prueba	4,0	7,5	4,0	7,5

Las variantes a usarse deben indicarse en la especificación para el material que está haciendo probado. Si ninguna variante esta especificada se utilizara la variante A.

Variante B, que se aplica a materiales que pasan la malla N°4 (4,75 mm) y se compactan en el molde de 152,4 mm de diámetro interior.

Variante C, que se aplica a materiales que pasan la malla ¾" (19 mm) y se compactan en el molde de 101,6 mm de diámetro interior.

Variante D, que se aplica a materiales que pasan la malla ¾" (19 mm) y se compactan en molde 152,4 mm de diámetro interior.

PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

La preparación de la muestra de materiales para terracerías, obtenida según se establece en el Manual M·MMP·1-01, Muestreo de Materiales para Terracerías, se hace de la siguiente manera:

De acuerdo con lo indicado en el Manual M·MMP·1-03, Secado, Disgregado y Cuarteo de Muestras como se muestra en la fotografía 1, se separa por cuarteos una porción representativa de aproximadamente 4 kg para las variantes A y C, y de aproximadamente 7,5 kg, para las variantes B y D.



Fotografía 1 Secado y cuarteado del material a compactar

En el caso de las variantes A y B, el material se criba a través de la malla N°4 (4,75 mm), mientras que para las variantes C y D el material se criba a través de la malla ¾" (19 mm); en ambos casos se efectúa el cribado en forma manual, colocando la fracción que pasa en una charola y desechando el retenido.



Fotografía 2 Cribado a través de la malla número 10

Se homogeniza perfectamente el material que constituye la porción de prueba como lo indica la fotografía 2.



Fotografía 3 Homogenización del material a compactar

Procedimiento de las pruebas

A la porción preparada, se le agrega la cantidad de agua necesaria como se muestra en la fotografía 4, para que una vez homogeneizada, tenga un contenido de agua inferior en 4 a 6% respecto al óptimo estimado.



Fotografía 4 Suministro de agua requerida para preparar la muestra

En el caso de que se hayan formado grumos durante la incorporación del agua, se revuelve el material hasta disgregarlo totalmente como se puede ver en la fotografía 5. Se mezcla cuidadosamente la porción para homogeneizarla y se divide en tres fracciones aproximadamente iguales, en el caso de la prueba estándar y en cinco porciones para la prueba modificada.



Fotografía 5 Homogeneizando el material con el agua agregada



Fotografía 6 La muestra se coloca en bolsas y se deja reposar por 24 horas en el cuarto de curado

Se coloca una de las fracciones de material en el molde de prueba seleccionado de acuerdo con la variante de que se trate, con su respectiva extensión, el cual se apoya sobre el bloque de concreto para compactar el material con el pisón que corresponda, aplicando 25 golpes para el caso de las variantes A y C ó 56 golpes para las variantes B y D, repartiendo uniformemente los golpes en la superficie de la capa, como se muestra en la fotografía 7. Para el caso de la prueba estándar se utiliza el pisón de 2,5 kg, con una altura de caída libre de 30,5 cm y para el caso de la prueba modificada, la masa del pisón y la caída libre serán de 4,54 kg y 45,7 cm, respectivamente. Se escarifica ligeramente la superficie de la capa compactada y se repite el procedimiento descrito para las capas subsecuentes.



Fotografía 7 Bloque de concreto utilizado para la compactación

Una vez terminada la compactación de la capa, se tiene que hacer un raspado de la capa terminada para tener una mejor adherencia entre capas compactadas como se ilustra en la fotografía 8.



Fotografía 8 Raspado de la capa compactada

Enseguida se coloca el material para empezar la compactación de la próxima capa, como se ve en la fotografía 9. Cabe mencionar que el material utilizado para la compactación debe de estar contenido en una charola y cubierto con una franela húmeda para que no pierda humedad.



Fotografía 9 Añadiendo material a compactar



Fotografía 10 Compactación del material con el pisón

Terminada la compactación de todas las capas, se retira la extensión del molde y se verifica que el material no sobresalga del cilindro en un espesor promedio de 1,5 cm como máximo; de lo contrario la prueba se repetirá utilizando de preferencia una nueva porción de prueba con masa ligeramente menor que la inicial. En el caso de que no exceda dicho espesor, se enrasa cuidadosamente el espécimen con la regla metálica como se detalla en las siguientes fotografías 11,12 y 13.



Fotografía 11 Retiro de la extensión del molde Proctor



Fotografía 12 Retiro del collarín del molde Proctor



Fotografía 13 Enrasado del molde con una regla metálica

Elaboración del espécimen de prueba

A continuación, se determina la masa del cilindro con el material de prueba y se registra como W_i , en gramos como se muestra en las fotografías 14 y15, anotándola en una hoja de registro.



Fotografía 14 Pesaje del cilindro con el material



Fotografía 15 Retiro del material compactado del cilindro

Se saca el espécimen del cilindro, se corta longitudinalmente y de su parte central se obtiene una porción representativa para determinar su contenido de agua (w) como se muestra en la fotografía 16, de acuerdo con el procedimiento indicado en el Manual M-MMP-1-04, Contenido de Agua; se registran los datos correspondientes a esta determinación en la misma hoja de registro como la mostrada la Figura.



Fotografía 16 Toma de muestra para el contenido de agua



Fotografía 17 Limpieza del molde Proctor para la siguiente prueba

Se incorporan las fracciones del espécimen al material que sobró al enrasarlo, en su caso, se disgregan los grumos, se agrega aproximadamente 2% de agua con respecto a la masa inicial de la porción de prueba y se repiten los pasos descritos anteriormente.



Fotografía 18 Pesaje de la siguiente muestra para la compactación



Fotografía 19 Preparación del material para la siguiente prueba

Con la misma porción de prueba se repite lo indicado, incrementando sucesivamente su contenido de agua, hasta que dicho contenido sea tal que el último espécimen elaborado presente una disminución apreciable en su masa con respecto al anterior. Para definir convenientemente la variación de la masa volumétrica de los especímenes elaborados respecto a sus contenidos de agua, se requiere compactar cuatro o cinco especímenes, que en la segunda determinación la masa del cilindro con el espécimen húmedo, sea mayor que en la primera y que en la penúltima determinación sea mayor que en la última.

En materiales degradables es conveniente preparar muestras de prueba diferentes para cada determinación.

Cálculos y resultados

En la hoja de registro como la mostrada en la Figura antes descrita, se anota la masa volumétrica del material húmedo de cada espécimen; para calcularla se emplea la siguiente expresión:

$$\gamma_m = \frac{W_i - W_t}{V} \times 1000$$

Donde:

γ_m = Peso volumétrico del material húmedo, (kg/m³)

W_i = Peso del cilindro con el material húmedo compactado, (gr)

W_t = Peso del cilindro, (gr)

V = Volumen del cilindro, (cm³)

Se calcula y se registra en la hoja de registro como la mostrada, la masa volumétrica seca de cada espécimen, empleando la siguiente expresión:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{100 + \omega} \times 100$$

Donde:

γ_d = Peso volumétrico seco del espécimen, (kg/m³)

γ_m = Peso volumétrico del material húmedo, (kg/m³)

w = Contenido de agua del espécimen, (%)

Se construye una gráfica como la incluida en la hoja de registro que se muestra en la Figura, en la que en el eje de las ordenadas se indican los pesos volumétricos secos (γ_d) y en el de las abscisas los contenidos de agua (w), se dibujan los puntos correspondientes a cada espécimen, los que se unen con una línea continua de forma aproximadamente parabólica denominada curva de compactación, la que determina la variación de la masa volumétrica seca del material para diferentes contenidos de agua y una misma energía de compactación.

Se determinan y reportan la masa volumétrica máxima seca del material, $\gamma_{d\text{máx}}$, en kg/m³ y su contenido de agua óptimo, w_o , en %, que se obtienen en forma gráfica de la curva de

compactación: La ordenada en el punto más alto de dicha curva representa la masa volumétrica seca máxima $\gamma_{dm\acute{a}x}$ y la abscisa de ese punto, el contenido de agua óptimo, w_0 .

En caso necesario, se determina la curva de saturación teórica del material, para lo que se calculan los contenidos de agua para las masas volumétricas secas, γ_d , con los que el material compactado quedaría saturado, γ_{dsat} . Este cálculo se realiza para 4 masas volumétricas secas diferentes, utilizando la siguiente expresión:

$$w_{sat} = \left(\frac{\gamma_0}{\gamma_d} - \frac{1}{s_s} \right) \times 100$$

Donde:

w_{sat} = Contenido de agua para el cual el material, en las condiciones de compactación, estaría saturado, (%)

γ_d = Masa volumétrica seca del material compactado, (kg/m^3)

s_s = Densidad relativa de sólidos del material, determinada según corresponda al tamaño de sus partículas, como se indica en el Manual M-MMP-1-05, Densidades Relativas y Absorción

γ_0 = Masa volumétrica del agua destilada a 4°C, (kg/m^3), considerada en la práctica como 1000 kg/m^3

En la misma gráfica que contiene la curva de compactación, se dibujan y unen con una línea continua, los puntos correspondientes a las masas volumétricas secas del material y los contenidos de agua para los cuales estaría teóricamente saturado, calculados como se indica anteriormente, obteniéndose la curva de saturación teórica; se verifica que la curva de compactación no corte la curva de saturación teórica. En la gráfica, se muestran las curvas de 100% de saturación teórica típicas correspondientes a materiales cuyas densidades relativas varían de 2,4 a 2,8. Es usual trazar también las curvas correspondientes a grados de saturación teórica de 90 y 95 %, las que si pueden ser cortadas por la curva de compactación. Para simplificar los cálculos que definen la curva de 100% de saturación teórica, dependiendo de la densidad de sólidos del material, los datos pueden tomarse de la gráfica.

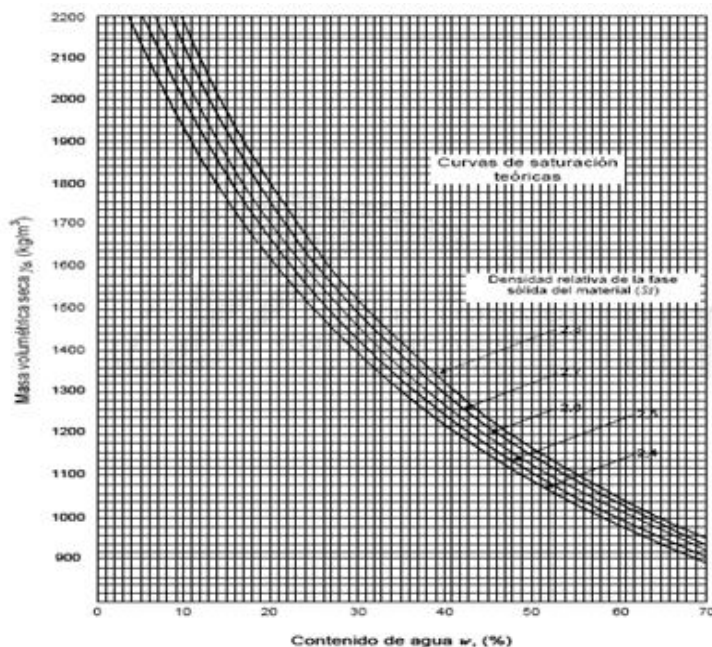


Ilustración 23 Curvas típicas de saturación teórica

Precauciones

Para evitar errores durante la ejecución de las pruebas, se observan las siguientes precauciones:

Que las pruebas se realicen en un lugar cerrado, con ventilación indirecta, limpia y libre de corrientes de aire y de partículas que provoquen la contaminación de las muestras de material.

Que la muestra utilizada para la prueba de compactación, se seque solamente lo necesario para poder disgregarla.

Que durante la compactación, los golpes del pisón se repartan uniformemente en toda la superficie del espécimen, aplicando los golpes sucesivos en puntos diametralmente opuestos, manteniendo la guía en posición vertical, cuidando que la caída del pisón sea libre y que la superficie del mismo se mantenga limpia.

Se hace con muestras donde se controla el contenido de agua en una bolsa de plástico y se deja reposando por 24 horas en un cuarto de curado.

Que el contenido de agua del primer espécimen sea inferior al óptimo y que en cada una de las ramas de la curva mencionada se defina como mínimo con dos puntos.

Errores posibles al realizar la prueba

Los errores más comunes que pueden afectar los resultados de estas pruebas pueden ser:

El mezclado incompleto del suelo con el agua o la incompleta destrucción de grumos en el suelo.

El no repartir uniformemente los golpes del pisón sobre la superficie del la muestra a compactar.

Las muestras tomadas para determinación del contenido de humedad no sean representativas del material compactado. En caso de que se requiera una seguridad mayor se puede determinar el contenido de agua de todo el material del molde.

El no determinar el número suficiente de puntos como definir la curva de compactación.
El continuo uso del material de compactación.

1.2.2 Pruebas por amasado

El método de compactación por amasado usado en el laboratorio es la prueba denominada “miniatura” que desarrolló S. D. Wilson en la universidad de Harvard, en los Estados Unidos.

En estos casos se busca reproducir en el laboratorio, el efecto que se tiene en muchos rodillos de campo, como son los rodillos pata de cabra o neumáticos en menor escala, con el firme propósito de lograr que el material sufra la misma estructuración interna que adquiere el suelo en campo.

En esta prueba el efecto de amasado se logra al presionar un émbolo de unas determinadas dimensiones contra la superficie de las diferentes capas de las que se constituye la muestra dentro de un molde, el cual tiene las dimensiones necesarias para formar una espécimen apropiado para la realización de las pruebas triaxiales convencionales; en cualquier aplicación se transmite al émbolo una presión constante, lo que se consigue cuando se le adapta un resorte calibrado, que permite saber el momento en que se aplica tal presión. Esta prueba se puede realizar en suelos de máximo 2 mm, lo que no puede ser un inconveniente, porque su campo de aplicación es en suelos finos, como son suelos arcillosos.



Ilustración 24 Equipo de compactación Harvard o "miniatura"

Preparación de la muestra

La prueba miniatura Harvard se ha desarrollada para ser utilizada en suelos finos como se mencionó anteriormente y no se ha intentado en la aplicación en suelos mayores a 2 mm. En esta prueba se requieren entre 1 y 1.5 kg de material para obtener una curva de peso específico contra contenido de agua definida con 6 u 8 puntos.

La preparación del suelo para dicha prueba es similar a otra prueba de compactación. Por lo que se colocan diferentes porciones de suelo en recipientes con aproximadamente con el contenido de agua deseado para la prueba a realizar, dejándola reposar unas 24 horas antes de empezar a compactarla. Esto garantiza una buena mezcla del agua y los suelos finos, lo que produce mejores resultados en la prueba, en los suelos donde se absorbe rápidamente el agua con resistencias en estado seco generalmente bajas, es suficiente mezclar el agua inmediatamente antes de empezar la prueba. Esta preparación de la prueba debe de ajustarse a las condiciones que se tendrán en campo para una mejor representatividad de los resultados y de la incorporación del agua en campo.

Procedimiento de la prueba.

Este procedimiento se pronuncia de forma general a continuación:

Con el molde ajustado a su base y provisto de su extensión colóquese en él la cantidad requerida de suelo en estado suelto, nivélese la superficie presionándola ligeramente con un pisón de hule.

Después de ajustar apropiadamente el resorte del pisón, insértese en el suelo el émbolo del pisón y presione hasta que el suelo empiece a comprimirse. Quítese la presión, se cambia el émbolo de posición y se vuelve a presionar, repartiendo la presión aplicada uniformemente en la superficie de la capa, hasta completar el número de aplicaciones deseado.

Se agrega la siguiente capa y repetir las operaciones indicadas anteriormente, se continua hasta obtener el número deseado de capas. La capa superior debe sobresalir por lo menos 1 cm por encima del molde, entrando en la extensión metálica del mismo.

Se lleva el conjunto del molde al aditamento para que se retire su extensión, presionando firmemente el émbolo del mismo aparato y a la vez se acciona el mecanismo extractor, se suelta el collar metálico del molde y del suelo compactado.

Se quita el molde de su base y se enrasa el borde superior cuidadosamente usando una regla metálica, verificando con la misma regla el enrasamiento del borde inferior del molde.

Se pesa el molde que contiene al suelo compactado, con una báscula de aproximación de 0.1 g.

Se extrae la muestra del molde utilizando el extractor y se coloca en un recipiente apropiado, como una cápsula, para que sea introducida en el horno a fin de que se determine su contenido de agua. Si el material se ocupa para determinar otros puntos de la curva de compactación, el contenido de agua deberá de determinarse del material excedente del borde superior del molde.

Se compactan los siguientes especímenes con contenidos de agua crecientes, hasta que el peso húmedo de la muestra vaya decreciendo, lo que indica que se ha sobrepasado el contenido de agua óptimo.

El peso específico seco correspondiente a cada contenido de agua podrá calcularse con la siguiente expresión:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{100 + \omega} \times 100$$

Que es la misma utilizada en las pruebas Proctor.

Se dibuja la curva de compactación.

También se puede variar el procedimiento de compactación variando el número de aplicaciones del pisón por capa, la presión aplicada o el número de capas.

Comparación y criterios de selección para las pruebas de laboratorio.

Para elegir una determinada prueba de laboratorio que sirva como base de proyecto o como norma de control en un proceso de compactación, los criterios se basan en la representatividad de las pruebas que se pueden obtener sobre resultados comparativos de procesos de compactación en campo y en el laboratorio.

El problema de la selección de la prueba de laboratorio apropiada puede expresarse en términos sencillos, ya que se trata de elegir la prueba que pueda reproducir la relación entre pesos volumétricos y contenidos de agua y sobre todo la estructura del suelo en campo, además, que permita estudiar el efecto de las condiciones de compactación en los suelos particulares que vayan a usarse, con el fin de definir de forma racional las condiciones en las que se lleve a cabo el proceso de compactación de campo.

Si se tiene el caso de un suelo fino, con pruebas de amasado se logra la máxima aproximación a la estructura del suelo que se vaya a compactar, esto sea comprobado por comparación de propiedades mecánicas. La compactación por impactos es menos apropiada y menos representativa, pero es probablemente aceptable en el área de vías terrestres aunque no necesariamente, sobre todo con fines de control de calidad, la mayor parte de las diferencias con respecto de la compactación de campo quedan seguramente dentro de las variaciones y desviaciones de los procesos constructivos prácticos.

De esta forma, la selección de la prueba patrón de laboratorio se reduce a escoger la energía de compactación que mejor reproduzca la relación entre el peso volumétrico y los contenidos de agua que se espera obtener en campo. Se tiene que tomar en cuenta que para realizar una prueba de compactación tiene prioridad una prueba de amasado o, cuando menos, dinámica, y se considera poco apropiado utilizar una prueba estática, cuya representatividad, que puede resultar mucho más problemática.

La elección estándar de la energía que convenga ha de hacerse con base en experiencia previa a pruebas de campo en secciones representativas a escala natural. Ayudará a conseguirlo toda la información que se pueda obtener sobre resultados comparativos de pruebas de laboratorio y procesos de campo.

1.3 Control de compactación en campo

El primer paso para aspirar a realizar un buen trabajo de compactación es conocer razonablemente bien los suelos que se vayan a compactar, esto se logra mediante la exploración general que se realice a lo largo de la línea, con el objeto de producir el estudio geotécnico del proyecto, y por la exploración particular que se efectuó en los bancos de donde se extraerán los materiales. Para estos fines se tendrán que recabarse muestras representativas y completas de alrededor de 40 o 50 kg, a fin de realizar con ellas las investigaciones de laboratorio.

La humedad natural del suelo en el campo es un dato importante. También lo será la información que se logre obtener por la curva de compactación, siguiendo el procedimiento de laboratorio que se estime reproduce mejor las condiciones de campo.

También se deben investigar las características de expansión y contracción por secado del suelo, para fijar el porcentaje de cambio de volumen que puede sufrir el suelo, si se utiliza en operaciones de vías terrestres, la expansión deberá estudiarse en especímenes compactados y saturado, y la contracción secando el suelo compactado.

La elección del equipo de compactación es fundamental. Antes de la elección, además de las características del suelo que se vaya a compactar, de las cuales se deberán ponderar cuidadosamente las condiciones estructurales que se desea obtener, de acuerdo con las condiciones de la obra que se construya y con la ubicación de la zona. Las consideraciones más importantes que se deben considerar antes de elegir el equipo apropiado para un determinado caso se podrían considerar las siguientes:

- Tipo de suelo que se tenga en campo
- Que se tengan diferentes tipos de suelo en la obra a realizar
- Tamaño de la obra a ejecutar, así como la importancia de realización
- Especificaciones de tipo de compactación fijadas en proyecto
- Tiempo de ejecución de los trabajos
- Equipos de compactación con los que se cuentan para realizar los trabajos

La selección de un equipo de compactación es fundamentalmente un asunto de economía, también sobre las características y los campos de aplicación de los diferentes equipos disponibles para compactar y de su enorme campo de aplicación entre unos equipos y otros, el desarrollo de los equipos ha sido regido por impulsos comerciales y muy pocas veces se ha realizado en base de un estudio científico. Se debe de tener varias alternativas de equipo de compactación, de las cuales se debe de decidir la combinación más favorable a los intereses económicos, la que lleve a satisfacer al mínimo costo los requisitos de calidad del proyecto.

En la siguiente tabla que se muestra a continuación está referida del libro de “Ingeniería de suelos en las vías terrestres” del autor Alfonso Rico, trata de mostrar las características de utilización de los suelos, no sólo en lo que respecta al problema de compactación, y otros varios.

Se debe de tener en cuenta que esta tabla no es un criterio forzoso para la elección del tipo de maquinaria a utilizar, ya que solo en una información de carácter general y condensado aunque puede ayudar para formarse un criterio.

Pero no exime de la obligación de realizar todos los estudios de detalle que se requieran para definir claramente las condiciones concretas a las que se haya de enfrentarse en una obra en particular.

Tabla 4. Características de utilización de suelos, agrupados según sucs.

símbolo	Características de compactibilidad	Peso volumétrico seco máximo. Típico (proctor estándar ton/m ³)	Compresibilidad y expansión	Permeabilidad y características de drenaje	Características como material de terraplén	Características como subrasante	Características como base	Características como pavimento provisional	
								Con revestimiento ligero	Con tratamiento asfáltico
GW	Buenas. Rodillos lisos vibratorios, rodillo neumático, Respuesta perceptible al bandeado con tractor	1.9 a 2.1	Prácticamente nula	Permeable. Muy buenas	Muy estable	Excelente	Muy buena	Regular a mala	Excelente
GP	Buenas. Rodillos lisos vibratorios, rodillo neumático, . Respuesta perceptible al bandeado con tractor	1.8 a 2.0	Prácticamente nula	Permeable. Muy buenas	Estable	Buena a excelente	Regular a mala	Pobre	Regular
GM	Buenas. Rodillos neumáticos o pata de cabra ligeros	1.9 a 2.2	Ligera	Semipermeable. Drenaje pobre	Estable	Buena a excelente	Regular a mala	Pobre	Regular a pobre
GC	Buenas o regulares. Rodillos neumáticos o pata de cabra	1.8 a 2.1	Ligera	Impermeable. Mal drenaje	Estable	Buena	Regular a buena	Excelente	Excelente
SW	Buenas. Rodillos neumáticos o vibratorios	1.7 a 2.0	Prácticamente nula	Permeable. Mal drenaje	Muy estable	Buena	Regular a mala	Regular a mala	Buena
SP	Buena. Rodillos neumáticos o vibratorios	1.6 a 1.9	Prácticamente nula	Permeable. Buen drenaje	Razonablemente estable en estado compacto	Regular a buena	Mala	Mala	Regular a mala
SM	Buenas. Rodillos neumáticos o pata de cabra	1.7 a 2.0	Ligera	Impermeable mal drenaje	Razonablemente estable en estado compacto	Regular a buena	Mala	Mala	Regular a mala
SC	Buenas a regulares. Rodillos	1.6 a 2.0	Ligera a media	Impermeable mal drenaje	Razonablemente estable	Regular a buena	Regular a mala	Excelente	Excelente

	neumáticos o para de cabra									
ML	Buenas a malas.	1.5 a 1.9	Ligera media	a	Impermeable mal drenaje	Mala estabilidad si no está muy compacto	Regular a mala	No debe usarse	Mala	Mala
	Rodillos neumáticos o para de cabra									
CL	Buenas a regulares.	1.5 a 1.9	Media		Impermeable no drenada	Buena	Regular a mala	No debe usarse	Mala	Mala
	Rodillos neumáticos o para de cabra									
OL	Regulares a malas.	1.3 a 1.6	Media alta	a	Impermeable mal drenaje	Inestable Debe evitarse su uso	Mala	No debe usarse	Muy mala	Muy mala
	Rodillos pata de cabra o neumáticos									
MH	Regulares a malas.	1.1 a 1.6	Alta		Impermeable mal drenaje	Inestable debe evitarse su uso	Mala	No debe usarse	Muy mala	Muy mala
	Rodillos pata de cabra o neumáticos									
CH	Regulares a malas.	1.3 a 1.7	Muy alta		Impermeable no drenada	Regular vigílese la expansión	Mala o muy mala	No debe usarse	Muy mala	No debe usarse
	Rodillos pata de cabra									
OH	Regulares a malas.	1.0 a 1.6	Alta		Impermeable no drenada	Inestable Debe evitarse su uso	Muy mala	No debe usarse	No debe usarse	No debe usarse
	Rodillos pata de cabra									
Pt	No debe usarse		Muy alta		Regular o mal drenaje	No debe usarse	No debe usarse	No debe usarse	No debe usarse	No debe usarse

Para estar seguros de contar con un proyecto adecuado no basta con emplear un estándar de compactación alto, basado en un estudio de laboratorio que utilice una prueba de compactación de alta energía específica. La prueba podría no ser representativa del modo de compactación que se utilice en campo, de manera que los suelos compactados en laboratorio con el procedimiento tuviesen la propiedades adecuadas ya que son muy pocos los interesados en saber las propiedades de verdadero interés de los suelos que se compactan, verificando su resistencia, su compresibilidad, o que poseen un buen esfuerzo-deformación, podría ser que el equipo utilizado en campo obtuviese un suelo con propiedades distintas hasta poco adecuadas, para el mismo peso volumétrico.

El peso volumétrico en el campo se fija con base en una prueba de laboratorio. Como una consecuencia de la diferencia esencial que existe entre ambos procesos de compactación y también como consecuencia de todos los problemas que en el campo pudieran presentarse.

El peso volumétrico que se obtiene en la obra no es idéntico al peso volumétrico máximo de la prueba de laboratorio que sirvió de base al estudio. La diferencia entre ambos valores, tradicionalmente se mide con el concepto de grado de compactación. Se puede definir este concepto como el grado de compactación de un suelo compactado en obra en relación de porcentaje, entre el peso volumétrico seco obtenido por la maquinaria de campo y el máximo correspondiente a la prueba de laboratorio en la que se basó el estudio, se debe tomar en cuenta la energía específica de compactación o densidad energética.

El grado o porcentaje de compactación de un suelo se puede obtener mediante la expresión:

$$G_c (\%) = 100 \frac{\gamma_d}{\gamma_{d_{\max}}}$$

Unas instituciones han tomado en cuenta, que si un material que fue depositado en obra, puede llegar a tener un grado de compactación antes de sufrir una compactación, según con la fórmula si otro material en las mismas condiciones puede tener un grado diferente de compactación, si este último se compacta hasta alcanzar el mismo grado que el primero se podría decir que están en igual de condiciones de compactación, sin embargo esto es falso, pues el primero está en estado suelto, lo que puede afectar su comportamiento mecánico, en tanto que el segundo ha sido compactado parcialmente, logrando que disminuyera su compresibilidad y aumentara su resistencia, además de adquirir propiedades estructurales diferentes al primero. Por lo tanto se ha adoptado una relación diferente para medir la compactación que alcanza el suelo en campo, la que es llamada compacidad relativa para suelos granulares y que para nuestro caso no es compactable con prueba Proctor y está definida por la siguiente expresión:

$$C. R. (\%) = 100 \frac{\gamma_d - \gamma_{d_{\min}}}{\gamma_{d_{\max}} - \gamma_{d_{\min}}}$$

Donde

$\gamma_{d_{\max}}$ Es el máximo peso volumétrico seco obtenido en las pruebas de laboratorio.

$\gamma_{d_{\min}}$ Es el mínimo peso volumétrico del material

γ_d Es el peso volumétrico del material seco del material compactado en obra.

El concepto de grado de compactación sigue siendo el método más usual para fijar el requisito de compactación que ha de lograrse en campo. El trabajo de compactación de un equipo en campo suele planearse para lograr el grado de compactación especificado en la forma más económica.

Este grado de compactación debe de ser coherente y no imponer requerimientos excesivos, que deban de cumplir el equipo de compactación y la importancia de la obra a realizar, para un mejor cumplimiento de los trabajos sin tener que detener la marcha de la ejecución por continuos ajustes en campo.

Las propiedades que podrían definir el balance óptimo de una compactación se mencionan a continuación:

1. Homogeneidad.
2. Características favorables de permeabilidad.

3. Baja compresibilidad para evitar el desarrollo de presiones de poro excesivas o deformaciones inaceptables.
4. Una resistencia al esfuerzo cortante adecuada para el proyecto.
5. Tener sus propiedades mecánicas en condiciones de saturación adecuada al proyecto.
6. Flexibilidad, que soporten asentamientos diferenciales sin agrietarse.

Para que se cumpla la primera condición depende en gran medida al equipo de compactación de campo y tener un correcto control de los procesos.

En los puntos 3 y 4 son continuamente contrarios con los últimos 3.

Para poder tener una mejor solución a este tipo de problemas que se pueden llegar a encontrar es la compactación con un contenido de agua muy próximo al óptimo de campo. Cuando se tenga que uno de los puntos de requisitos se considere más importante que otro, se debe modificar en el sentido en que convenga la especificación del contenido de agua de compactación, como un ejemplo se consideraría si los puntos 3 y 4 se consideran de mayor interés que en los puntos 5 y 6, deben especificarse un contenido de agua menor que el óptimo, y mayor, en caso contrario.

El punto 5 puede investigarse mediante pruebas triaxiales que se sometan a saturación bajo diversas cargas, así se llegará a un valor mínimo aceptable del contenido de agua de compactación.

Al especificar el mínimo peso volumétrico seco debe considerarse la experiencia acumulada en la construcción de obras similares.

El requisito de compactación se fija en términos del equipo que se vaya a usar, del resultado que se espera obtener o una combinación de ambas. Un determinado requisito requiere un conocimiento detallado de la sensibilidad del suelo compactado a todas las variables de importancia en el proceso de compactación, el contenido de agua es probablemente lo que más influye. Muchas veces el requisito de compactación se omite toda referencia al contenido de agua y entonces tal especificación puede cumplirse con un amplio intervalo de contenidos de agua, ajustándolo al tipo de equipo y al modo de empleo. Pero también el suelo que se compacte puede tener una amplia variedad de comportamientos, independientemente de que se alcance el mismo peso volumétrico seco.

La humedad de compactación es un valor fundamental en cualquier proceso de campo. Existe un contenido de agua óptimo, para el cual la eficiencia de compactación es máxima en determinadas condiciones. Pero es común ver que se trate al concepto de humedad óptima como si fuera una constante básica del suelo y no un concepto variable que cambia con el método que se utilice para compactar además de otros factores, siendo con seguridad la energía de compactación la variable específica que más influye en la humedad óptima de un proceso, que al aumentar la energía específica tiende a disminuir la humedad óptima. La humedad óptima depende y varía con el tipo y modo de utilización del equipo de compactación.

Se puede determinar en forma precisa la humedad con la que se debe compactar el suelo en cada caso y con el equipo que vaya a usarse si se hacen terraplenes de prueba, en donde se manejen escalas de 1:1 se compacte el suelo en todas las formas que hagan falta, siguiendo exactamente el tren de trabajo de la obra futura, para definir el propio contenido de agua, el espesor de las capas compactadas, el número de pasadas del equipo y todas las demás variantes que puedan influir en el resultado que se espera obtener. El contenido de agua óptimo correspondiente a la prueba de laboratorio que haya servido como base al proyecto no será igual a la humedad óptima de campo,

podrá servir como una guía o punto de partida para proponer el rango en el que se comenzaran a probar las humedades de campo.

Con frecuencia resulta antieconómico y muy conflictivo el uso de terraplenes de prueba para definir las condiciones idóneas de la compactación de cada pequeño tramo. Entonces se deberá ejercer un criterio y una máxima experiencia, y la única norma general que puede darse es que se esté dispuesto en todo momento a cambiar las normas implantadas y que, y que también se esté alerta en todo el conjunto de variables que puedan afectar el resultado que se espera obtener. El laboratorio se debe usar en forma intensa para verificar las continuas condiciones finales y como calibrador de experiencia y norma de criterio para sugerir cambios en busca de un proceso ideal.

Con frecuencia los suelos han de ser humedecidos o secados en el banco o sobre el terraplén. Por lo general es difícil añadir al suelo más de 1 ó 2% de humedad en el terraplén, y en ocasiones es imposible secarlo ahí mismo, como cuando son húmedas las condiciones climáticas prevalecientes. El humedecimiento es mucho más fácil en el banco. El secado suele hacerse por aireación y a veces se ayuda con mezcladores mecánicos. En todos los casos en que haya variar la humedad original del suelo, lo fundamental es lograr una distribución homogénea del nuevo contenido de agua. Cuando la variación de la humedad se dificulte al grado de no poderse lograr las condiciones previstas por el proyecto, este deberá modificarse correspondientemente.

La energía de compactación queda representada a fin de cuantas para un equipo determinado por el número de pasadas de dicho equipo por un mismo lugar.

Se puede tener un número de pasadas del equipo muchos mayores de las cuales es muy pequeña la ganancia en resultado, aun cuando el número se incremente mucho a gran costo.

Cuando se alcance el número de pasadas crítico sin lograr obtener el requisito de fijado para campo, deberá replantearse el problema, a fin de ver de cual o cuales de los factores debe modificarse.

La velocidad de circulación del equipo de compactación es importante, pero no ha sido suficientemente estudiado, en las recomendaciones que establecen los fabricantes para la velocidad de operación, no hay diferencias fundamentales en el funcionamiento de los equipos. Se tiene que cuando los equipos de compactación circulan con rapidez, lo cual es conveniente desde el punto de vista de economía, hay tendencia a que la superficie superior de la capa quede ligeramente ondulada, pero por lo general esto tiene poca importancia.

En el proceso de compactación es de gran importancia el espesor de la capa compactada, para un determinado suelo, equipo de compactación y el requerimiento del mismo, a medida que aumenta el espesor de la capa aumenta el número necesario de pasadas, resulta más económico satisfacer los requerimientos de la compactación cuanto más gruesa sea la capa de compactada, por lo que en principio debería usarse el mayor espesor posible. Esta regla tiene un límite en la disipación del efecto compactador con el espesor de la capa, cuanto mayor sea el grado de compactación que se exija, más delgadas deberán ser las capas con que se trabaje.

Es frecuente que en trabajos de terracerías los espesores óptimos de capa fluctúen entre los 20 y 30 cm, cuando no se usan equipos vibratorios y que en general permiten capas de mayor espesor.

La liga entre capas sucesivas debe ser debidamente garantizada, que las capas sean horizontales sobre todo en lugares de pendiente transversal importante, para tener resistencia a cualquier deslizamiento. Cada que haya duda sobre la capacidad sobre una superficie determinada para

ligarse en forma conveniente con la capa siguiente, deberá levantar ligeramente la última superficie de la capa compactada antes de tender la siguiente.

También se mencionara brevemente algunos problemas de naturaleza especial relacionados con el problema de compactación de campo:

Compactación de zonas difíciles, inaccesibles para los equipos de compactación.

Esto por lo general se presenta con cierta frecuencia y pueden ocasionar el uso ineficiente de equipos en distancias cortas hasta el empleo de equipos en distancias cortas hasta el empleo de equipos y métodos especiales de rendimiento reducido.

En la construcción de carreteras suele presentarse este problema, en fondo de cañadas profundas y angostas, en que no se justifican caminos de acceso al fondo de la misma por los pequeños volúmenes que hay que compactar. Una práctica común en tales casos es rellenar a volteo el fondo hasta a un nivel a partir del cual pueda trabajarse mecánicamente. El caso se complica cuando se tiene en el fondo de la barranca una obra de drenaje, dicha obra, impone condiciones al material que la rodea y la recubre, en el fondo de barrancas es común, en el caso de carreteras y ferrocarriles, que el material colocado lo constituyan tamaños más o menos gruesos, incluyendo muchas veces fragmentos de roca. Se usan técnicas para compactar estos materiales son las correspondientes a los pedraplenes.

Zonas próximas a puentes, alcantarillas, muros de retención, etc.

Para este tipo de casos los equipos manuales proporcionan buenos resultados. Un caso particular lo constituyen los colchones de protección de las obras de drenaje, los cuales han de constituirse dentro de los requerimientos especiales que estas obras imponen según su tipo.

Compactación en los bordes de los terraplenes

A medida que la construcción de un terraplén progresa en altura, se va presentando el problema de la compactación en sus taludes, por el doble motivo de que el equipo de compactación no puede orillarse demasiado durante su operación y por la falta de confinamiento lateral que se tiene en las zonas de borde. El problema suele resolverse dando una elongación a lo ancho a ambos lados del terraplén, donde quizá sean suficientes 30 a 40 cm, el cual se puede recortar y afinar al final de la construcción.

En los terraplenes muy bajo el problema puede justificarse la adopción de taludes suficientemente tendidos como para que sobre ellos circule el equipo de compactación. Las obras complementarias de drenaje y las de protección con forestación u otros medios pueden ayudar mucho a disminuir los efectos de una mala compactación en los taludes.

Compactación de las primeras capas sobre terrenos blandos

Cuando se vaya a construir una carretera sobre un suelo de cimentación muy blando, suele presentarse el problema de falta de apoyo suficiente para una buena acción del equipo de compactación sobre las primeras capas de la base. El desmonte y despalle adecuados del terreno natural, seguidos de una buena ventilación, cuando las condiciones lo permitan, puede ayudar a resolver el problema, si este no es el caso, podrá construirse en toda la zona de desplante una plantilla de trabajo, preferentemente de material granular fino, con un espesor de 20 a 30 cm, al compactar esta capa se mejorara también la parte superficial del suelo natural, mejorando las condiciones de conjunto. La plantilla de trabajo podrá ser bastante más resistente cuando exista agua permanente, pues en tal caso deberá sobresalir algo de agua.

Se tiene que tomar en cuenta que los suelos arcillosos blandos muchas veces poseen una costra relativamente más firme, producto del secado por evaporación, el remover esta capa o su debilitamiento contribuirá a hacer más difíciles las condiciones de trabajo.

Suelos friccionantes que se tornan movedizos

La experiencia ha mostrado que algunos suelos, tales como limos no plásticos, arenas muy finas o polvo de roca, cuando se compactan en zonas de nivel freático alto atraen agua por capilaridad hasta su superficie y se vuelven movedizos, con pérdida casi total de su resistencia. El mismo efecto puede presentarse en tales suelos si se compactan con un excesivo contenido de agua. Al presentarse el problema, es muy fácil secar estos suelos haciendo incisiones poco profundas y oreo, si se logra eliminar la fuente de agua que los ha saturado, pero es en este punto donde puede ocurrir problemas casi ineludibles, en aéreas pequeñas el problema se puede eliminar con la colocación de una capa de material granular grueso que rompa la capilaridad e impida la subida del agua, en otros casos podrá abatirse el nivel freático por medio de subdrenes laterales de zanja. Cuando todo lo anterior no sea posible, deberá procurarse no alterar al terreno natural y usar sobre estos materiales gruesos apropiados, modificando el proyecto cuando sea necesario.

Problemas derivados de la sobre compactación.

La creencia común de que cualquier aumento en el peso volumétrico seco de un suelo por compactación va acompañado por un mejoramiento general de sus condiciones la desmienten en forma drástica en algunos casos, frecuentes en la práctica, en los que, por el contrario, puede llegar a condiciones francamente desfavorables por compactar los suelos más allá de un cierto límite. No es posible mencionar todo los casos de sobre compactación perjudicial, pero algunos de los más comunes son los siguientes:

Suelos en los que la sobre compactación produce un cambio estructural que los hace inadecuados. Quizá el caso más típico es el de los tezontles, la espuma de basalto, que se utilizan como terraplenes ligeros sobre suelos compresibles blandos. La sobre compactación rompe los fragmentos porosos, produciendo una granulometría más variada y abundante cantidad de finos, todo lo cual puede hacer llegar al material fuertemente compactado a pesos volumétricos incluso más altos que los de cualquier material térreo convencional que se hubiere usado, haciendo perder por completo la ventaja de su utilización.

Materiales expansivos o con un rebote elástico. Los materiales expansivos son fuente de problemas muy graves, sobre todo donde las condiciones climáticas conducen a cambios significativos en el contenido de agua de diferentes épocas del año. También lo son cuando la construcción se efectúa durante la época de secas y el suelo absorbe humedad en la subsecuente estación lluviosa. Si estos suelos se compactan en exceso, se expandirán mucho y generaran presiones de expansión muy grandes al humedecerse tras la compactación, por el contrario, si se compactan con un contenido de agua apropiado y solo hasta un límite justo, las expansiones se podrán reducir al mínimo, para tal fin, el requisito de compactación en general no tendrá nada que ver con el peso volumétrico seco máximo o la humedad óptima de cualquier prueba de laboratorio que se use como prueba de control. Ahora, la humedad y el peso volumétrico apropiados para la compactación deberán determinarse en un estudio de expansión. Es fundamental el control de la humedad de compactación durante el proceso. Otro tanto puede decirse de los suelos que contienen un rebote elástico, por ejemplo bajo el paso cargas en movimiento, este efecto, que conduce a una destrucción rápida del pavimento, por ejemplo, es mucho más notable cuando el suelo se compacta mas allá de un cierto límite, que deberá determinarse también con base en estudios especiales.