



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

COMPACTACION Y EQUIPO EN
TERRACERIAS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
NESTOR ALEJANDRO CEBALLOS GARCIA



MEXICO, D. F.

1992

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I N D I C E

CAPITULO 1

I. INTRODUCCION.

. Conjunto de Métodos de mejoramiento de suelos.....	4
. Métodos Físicos.....	4
. Métodos Químicos (estabilizaciones).....	5
. Métodos Mecánicos.....	5

CAPITULO 2:

II. CLASIFICACION DE LOS SUELOS

. Suelos gruesos.....	14
. Suelos finos.....	15
. Identificación de suelos gruesos en campo.....	15
. Identificación de suelos finos en campo.....	17

CAPITULO 3

III. PROCEDIMIENTO DE COMPACTACION, FACTORES QUE INTERVIENEN Y SUS PRUEBAS DE LABORATORIO

. Naturaleza del suelo. Granulometría del material.....	27
. Contenido de humedad del material.....	28
. Energía específica.....	29
. Peso del compactador.....	31
. Presión de contacto.....	31
. Velocidad del equipo.....	32
. Espesor de Capa.....	32
. Número de pasadas del equipo.....	34
. Pruebas de laboratorio.....	35
. a) Prueba Próctor.....	35
. b) Prueba Próctor Modificada.....	38
. c) Prueba Porter.....	39
. Métodos de control.....	41
. a) Medida física de peso y volumen.....	41
. b) Mediciones nucleares.....	42
. c) Otros.....	43

CAPITULO 4

IV. TRABAJO DEL EQUIPO DE COMPACTACION.

- . Compactación por presión estática.....44
- . Compactación por impacto.....46
- . Compactación por vibración.....46
- . Compactación por amasamiento.....49
- . Compactación mixta.....50
- . Compactación con la ayuda de enzimas.....51

CAPITULO 5.

V. COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS.

- . Equipo de compactación.....52
- . Rodillos metálicos.....52
- . Rodillos neumáticos.....55
- . Rodillos pata de cabra.....59
- . Compactadores del tipo rejilla.....62
- . Rodillo de impacto.....64
- . Rodillos vibratorios.....67
- . Selección de compactadores.....68

CAPITULO 6

VI. RENDIMIENTOS Y COSTOS EN LA COMPACTACION

- . Rendimiento de un equipo de compactación.....72
- . Costo de la compactación.....75
- . Ejemplos.....79

CAPITULO 7

- VII. . Conclusiones y Recomendaciones.....87
- . Bibliografía.....88

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

CAPITULO 1

INTRODUCCION.

La palabra compactación resulta de hacer un sustantivo del adjetivo "compacto" el cual deriva del latín "compactus" que es el participio pasivo de "compingere" y que significa unir, juntar.

Compactación es el proceso mecánico por el cual se busca mejorar las características de resistencia, compresibilidad y esfuerzo de deformación de los suelos, este proceso generalmente implica una reducción más o menos rápida de los vacíos, como consecuencia de lo cual en el suelo ocurren cambios de volumen de importancia, fundamentalmente ligados a pérdida de volumen de aire, esto ocurre a un suelo cohesivo pues comúnmente no se expulsa agua de los huecos durante el proceso de compactación en suelos cohesivos. No todo el aire sale del suelo, por lo que la condición de un suelo compactado es la de un suelo parcialmente saturado.

Desde tiempos antiguos se ha reconocido la conveniencia de compactar los terraplenes de los caminos para obtener una mayor estabilidad en éstos.

Hasta hace algún tiempo se podía contar con la compactación hecha por las unidades de transporte y por las aplanadoras improvisadas, junto con los asentamientos naturales del terreno, para estabilizar los terraplenes de modo que retuvieran su forma y soportaran las cargas que se colocaran en ellos.

La necesidad de una compactación adecuada puede ser expresada o explicada teniendo en cuenta que no hay un factor más importante, a excepción de las correctas condiciones de drenaje, que tenga mayor influencia en las condiciones funcionales de cualquier vía terrestre, como pueden ser terraplenes, sub-bases, bases y superficies de

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

rodamiento. El objetivo principal de la 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 de caso a caso, pero la resistencia, la compresibilidad y una adecuada relación esfuerzo-deformación figuran entre aquellas cuyo mejoramiento siempre se busca, en menor escala, aunque a veces no menos importante, es que también se compacte para obtener unas características idóneas de permeabilidad y flexibilidad. Finalmente suele favorecerse mucho la permanencia de la estructura térrea ante la acción de los agentes erosivos como consecuencia de un proceso de compactación.

En las últimas décadas los estudios de laboratorio han resuelto muchos de los problemas del comportamiento mecánico del suelo, se ha progresado considerablemente y consecuentemente se han desarrollado técnicas que facilitan y economizan los trabajos de compactación de suelos. Paralelamente a dichos avances, los fabricantes han diseñado una amplia variedad de equipos para producir el óptimo de compactación con un máximo de economía.

Resulta evidente que la compactación adecuada de un suelo no es un estado fácil de conseguir en la construcción de las obras civiles. El problema es complejo por sí mismo y sus aplicaciones se complican por muchas ramificaciones, por lo que los ingenieros civiles deben tener una clara comprensión de los problemas implicados.

La compactación resulta ser un proceso de objetivos múltiples y ello propicia la complicación del proceso, es claro que muchos de los objetivos serán contradictorios en muchos problemas concretos, en el sentido de que las acciones que se emprendan para cumplir con uno pudieran perjudicar a algún otro, en términos generales puede ser cierto que una compactación intensa produce un material muy resistente, pero sin duda muy susceptible al agrietamiento.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

Considerando que la vida útil de una obra en la que interviene la compactación, dependerá en gran medida del grado de compactación especificado, ya que es de suma importancia que durante la ejecución de los trabajos se lleve un estricto control de éstos para cumplir en la medida de lo posible con las especificaciones del proyecto.

De esta manera el problema de la compactación de los suelos resulta íntimamente ligado al control de calidad de los trabajos de campo, por lo que es necesario que al realizar un proceso de compactación se verifique si con él se lograron los fines propuestos. Con el fin de llevar a cabo una verificación y control de los trabajos de compactación a ejecutar incluyendo también los que estén en proceso, es preciso, que se lleven a cabo pruebas de laboratorio que midan, estimen, o den un idea lo más cercana posible al valor real de los parámetros y propiedades de los suelos en cuestión. Dichas pruebas nos ofrecen la posibilidad de conocer de manera aproximada la resistencia, compresibilidad y permeabilidad, flexibilidad y las relaciones esfuerzo-deformación, pero éstas suelen ser pruebas que requieren un tiempo de ejecución demasiado largo para controlar el proceso de compactación que avanza de manera normal.

Cabe mencionar que esta verificación puede ocasionar demoras, problemas de pago, problemas legales, etc. Esta multiplicidad de problemas que intervienen en la compactación de suelos y que tantas veces los hace trascender de la esfera meramente técnica, se deben manejar de una manera razonable, ya que éstos le imprimen a las conclusiones y soluciones un carácter distintivo que no debe ignorar quien tiene que manejarlos.

Los contratistas que deben realizar el trabajo de construcción de las obras en las que interviene la compactación, pueden mediante un conocimiento general de la muchas variables que intervienen, seleccionar sus procedimientos y los equipos de compactación, eliminando de esta manera algunos gastos y demoras que la inadecuada compactación pudiera causarles.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

La realización de proyectos cada vez mas ambiciosos y de programas de ejecución más agresivos, ha originado una intensa y constante evolución de los equipos de compactación. El desarrollo de equipos de compactación ha sido explosivo en los últimos años. Se han introducido mejoras, tales como: Poderosos sistemas hidráulicos, sensores electrónicos confiables, diseños más funcionales, mayor versatilidad en su uso, transmisiones rápidas, potentes motores, etc., a los cuales se han traducido en un mayor rendimiento de los equipos.

Con el objeto de cumplir con plazos de construcción cada vez menores en la ejecución de obras cada vez mayores, se ha llegado a la necesidad de utilizar equipos de gran producción. Los grandes equipos de carga, acarreo, y tiro de material, han obligado a los fabricantes de equipos de compactación a diseñar máquinas compactadoras capaces de balancear el tiro con la compactación para evitar interferencia de actividades en sus programas de ejecución y pérdidas de tiempo, lo que dá por resultado un proyecto antieconómico.

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

Conjunto de Métodos de mejoramiento de suelos.

Métodos Físicos.

- Confinamiento (Suelos Friccionantes)
- Consolidación previa (Suelos finos Arcillosos o suelos cohesivos)
- Mezclas (Suelo con suelo)
- Vibroflotación

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

Métodos Químicos (estabilizaciones).

- Con sal
- Con cemento
- Con asfalto
- Con cal
- Con otras substancias.

Métodos Mecánicos.

- Compactación

En la ingeniería civil no hay ningún otro asunto que sea practicado con tan poca importancia y dirección como el problema de la compactación. La poca trascendencia que se le dá a este problema influye directamente en los resultados obtenidos y por consiguiente en los costos y en la vida útil de la obra de que se trate. En estos tiempos de costos siempre crecientes su influencia es crítica.

Así pues, los procesos de compactación han de estudiarse con referencia a las técnicas de campo y a todo el conjunto de técnicas de laboratorio y a la investigación de las propiedades que es posible obtener en los suelos compactados.

De acuerdo con estos 3 puntos de vista el ingeniero podrá contar con elementos para establecer un criterio adecuado en la toma de decisiones, establecimiento de los cursos de acción y elaboración de los programas de ejecución, evitando con esto retrasos y erogaciones innecesarias que pudieran provocar la rescisión de un contrato determinado.

Considerando importante y oportuno señalar que en lo sucesivo nos referiremos en el contenido de ésta tesis, desde el punto de vista del constructor, sin entrar en

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

detalle en el diseño de terrapienes y especificaciones de compactación .

Las terracerias son aquellos volúmenes de materiales que son necesarios de excavar y los que sirven como relleno para formar la obra.

Las terracerias están formadas por dos partes que son:

El cuerpo del terraplén, que es la parte inferior de la obra y que está formada por capas que pueden ser de material compactable o no compactable, en el primer caso dichas capas tendrán un espesor de 30 a 60 cm., que dependerá del equipo de compactación del que se disponga. En el segundo caso, el espesor de la capa estará dado por el tamaño máximo del material que se esté obteniendo del banco de préstamo o de algún corte y la capa subrasante, que es la superior, debe tener un espesor mínimo de 30 cm y que es necesario colocarla independientemente de la sección que se tenga, ya sea esta de terraplén en cajón o en balcón. La capa de subrasante deberá cumplir con normas de resistencia mínima, expansión máxima y algunas otras características que dependerán de las funciones que vaya a tener la estructura.

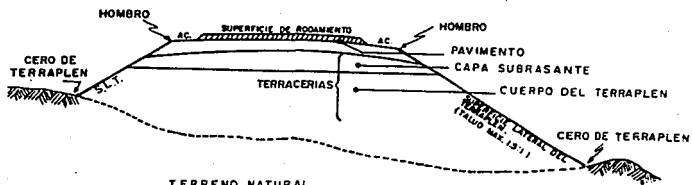
Cuando la intensidad de tráfico en un camino, es mayor de 5,000 vehículos diarios, a los 50 cm superiores del cuerpo del terraplén se le llama capa subyacente.

Las secciones transversales típicas de una vía terrestre son las siguientes:

- En terraplén
- En cajón
- En balcón o mixta

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

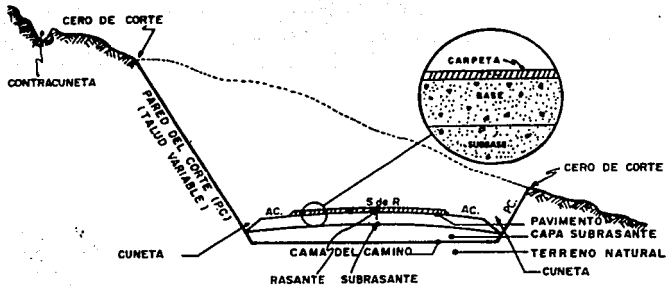
A continuación se muestran las secciones mencionadas:



TERRENO NATURAL

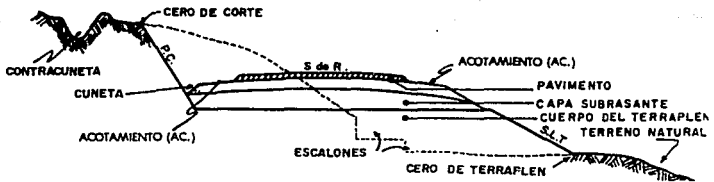
Sección transversal típica en terraplén, para carreteras de dos carriles

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS



Sección transversal típica en corte, para carreteras de dos carriles; se muestra un detalle de pavimento flexible.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS



Sección transversal típica mixta o en balcón, para caminos de dos carriles.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

Los materiales que se utilizan en la construcción del cuerpo del terraplén se dividen en materiales no compactables y compactables, aunque esta denominación no es correcta, ya que todos los materiales son susceptibles de ser compactados, sin embargo, la clasificación se hace en base a la facilidad de los materiales a ser compactados por los métodos usuales.

Se dice que un material es compactable, cuando después de disgregado tiene menos del 20% de retenido en la malla de 7.5 cm (3 pulg), pero menos del 5% de retenido en la malla de 15 cm (6 pulg.). Lo anterior se discutirá en el capítulo siguiente.

CAPITULO: 2

CLASIFICACION DE LOS SUELOS.

Los suelos son todos aquellos tipos de materiales terrosos, que pueden estar parcialmente cementados de tal forma que se ablanden o se desintegren con facilidad bajo la acción de la intemperie. Es decir, un suelo es un conjunto de partículas minerales que son producto de la desintegración mecánica o la descomposición química de rocas preexistentes, y sus partículas sean de 7.6 cm. (3") subdividiéndose en suelos con partículas gruesas, que son en los que más de la mitad del material se retiene en la malla No. 200; por lo tanto, las rocas ígneas, metamórficas y los depósitos sedimentarios altamente cementados no serán considerados como suelos, cuando sus fragmentos o partículas sean de 7.6 cm. (3") o mayores y menores de 2m. [(subdividiéndose en Grandes cuando son mayores de 75 cm. y menores de 2m., Medianas si son mayores de 20 cm. y menores de 75 cm., y Chicas si son mayores de 7.6 cm. y menores de 20 cm.)]

Este conjunto de partículas presenta dos propiedades esenciales, que para estudiar y entender su comportamiento en la ingeniería, no pueden ser pasadas por alto o ignoradas.

Una de estas propiedades es que el conjunto posee una organización definida y propiedades que varían tanto en dirección como en sentido. En general, en los valores de las propiedades ocurren cambios mucho más rápidos verticalmente que horizontalmente. En otras palabras, el suelo no es isótropo, aunque en muchos aspectos teóricos así se considere.

En segundo término, la organización de las partículas minerales es tal, que el agua, que como es sabido está presente en todo suelo en mayor o menor cantidad, puede si la hay suficiente, tener "continuidad", en el sentido de distribución de presiones. El agua ocupa huecos aislados, sin intercomunicación, puede llenar todos los poros que

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

dejan entre si las particulas minerales y que se intercomunican, de manera que el agua forma una masa continua que contiene al mineral en su seno. Por lo tanto, el agua contenida en un suelo debe considerarse parte integral del mismo, de suma importancia ya que influye directamente en su comportamiento mecánico.

Debido a la forma en que son originados, los suelos pueden ser residuales o transportados. Los primeros son los que se encuentran directamente sobre la roca de la cual se derivan y los transportados son los que se encuentran sobre estratos sin relación directa con ellos, es decir, son removidos, acarreados y depositados en otra zona por los agentes geológicos. Estos agentes de transporte son principalmente el viento, los ríos, las corrientes superficiales de agua, los glaciares, las fuerzas de gravedad y las combinaciones de estos.

Es claro que la estructuración y la distribución interna de las propiedades de un suelo tienen que ser distintas en un suelo residual y en un suelo transportado. El ataque mecánico y la desintegración química en los suelos residuales tienden a producir una estructura final muy semejante a la de la roca de la cual se originó y los suelos transportados generan estructuras que están regidas únicamente por los mecanismos propios del depósito de las particulas y no tiene nada que ver con las características y condiciones originales de la roca.

Es importante distinguir estos dos tipos de suelo, ya que la Mecánica de Suelos generalmente se refiere a los suelos transportados, por ser estos los que se encuentran frecuentemente o siempre en los valles y planicies en donde están asentadas las ciudades. Durante la construcción de las obras de una ciudad se encuentran con problemas originados por el suelo debido a su comportamiento mecánico, lo que consecuentemente provoca un intenso estudio de las propiedades de estos tipos de suelo, que como ya mencionamos, son los que generalmente se encuentran en los lugares donde se asientan las ciudades. De esta manera se estudian las propiedades de los suelos transportados y es frecuente que lleguen a confundir dichas propiedades con las de los suelos residuales, aun cuando evidentemente son diferentes. La confusión estriba

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

principalmente en que no se deben considerar las mismas propiedades en los dos tipos de suelos indistintamente, ya que estos ocasionaria un error en los proyectos, por lo tanto influiria en la vida útil de la obra y la seguridad de la misma.

En el campo de las vías terrestres, los suelos son infinitamente variables y complejos, por lo que es necesario clasificar estos de la mejor y más completa forma posible.

Una de estas maneras de "clasificar" un suelo es por medio de su granulometría, es decir, dividirlo en sus fracciones de granos y denominar particularmente a las distintas fracciones en un determinado rango de tamaños. Pero a su vez, el sistema debe clasificarlos de acuerdo con sus propiedades mecánicas, ya que son estas las que interesan en las aplicaciones de la ingeniería.

Dicho sistema de clasificación deberá ser cualitativo y servir para normar un criterio antes de conocer más profundamente las propiedades de un suelo, para que de esta manera se pueda saber en que direcciones es conveniente profundizar la investigación del suelo en cuestión.

Los sistemas puramente granulométricos resultan poco apropiados e inseguros ya que las correlaciones de la distribución granulométrica con las propiedades fundamentales entrañan excepciones y casos especiales.

A pesar de lo anterior el sistema más efectivo de clasificación de suelos es el propuesto por A. Casagrande y conocido con el nombre de "Sistema Unificado de Clasificación de Suelos" (S.U.C.S.).

Este sistema considera los suelos gruesos y los suelos finos, distinguiéndolos por el cribado a través de la malla número 200; las partículas gruesas son mayores que dicha malla y las finas menores.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

Un suelo se considera grueso si más del cincuenta por ciento de sus partículas son gruesas, y fino si más de la mitad de sus partículas en peso, son finas.

1) SUELOS GRUESOS.

Cada grupo está designado por un símbolo que consiste en dos letras mayúsculas, que son las siglas de los nombres ingleses de los suelos más típicos de ese grupo.

G (GRAVEL): Gravas y suelos en que predominen éstas.

S (SAND): Arenas y suelos arenosos.

Las gravas y las arenas se separan con la malla número 4, de manera que un suelo pertenece al grupo genérico G (GRAVEL), si más del cincuenta por ciento de su fracción gruesa (fracción retenida en la malla número 200) no pasa la malla número 4; y será del grupo genérico S (SAND), si más del cincuenta por ciento de su fracción gruesa pasa a través de la malla número 4.

a).-SIMBOLO W (WELL GRADED):

Se trata de un material prácticamente limpio de finos. En combinación con los símbolos genéricos, se obtienen los grupos GW (GRAVEL WELL GRADED); gravas bien graduadas y SW (SAND WELL GRADED); arenas y suelos arenosos bien graduados.

b).-SIMBOLO P (POORLY GRADED):

Se refiere a un material prácticamente limpio de finos, mal graduado. Y que en combinación con los símbolos genéricos, da lugar a los grupos GP (GRAVEL POORLY GRADED); gravas mal graduadas y SP (SAND POORLY GRADED); arenas y suelos arenosos mal graduados.

c).-SIMBOLO M (del Sueco MO y MJALA):

Se trata de un material con una cantidad apreciable de finos no plásticos. Que en combinación con los símbolos genéricos da lugar al grupo GM; que son gravas con cantidad

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

apreciable de finos no plásticos y al grupo SM; que son arenas con cantidad apreciable de finos no plásticos.

d).-SIMBOLO C (CLAY):

Se trata de un material con una cantidad apreciable de finos plásticos que en combinación con los símbolos genéricos da lugar a los grupos GC; que son gravas con cantidad apreciable de finos plásticos y SC; que son arenas con cantidad apreciable de finos plásticos.

2) SUELOS FINOS.

También en este caso el S.U.C.S. considera a los suelos agrupados, formándose al símbolo de cada grupo por dos siglas mayúsculas, elegidas con un criterio similar al usado para la clasificación de los suelos gruesos y dando lugar a las siguientes divisiones.

M (del Sueco MO y MJALA): Limos inorgánicos.

C (CLAY): Arcillas inorgánicas.

D (ORGANIC): Limos y Arcillas Orgánicas.

Cada uno de estos tres tipos de suelos se subdividen, según su límite líquido en dos grupos. Si el límite líquido es menor del cincuenta por ciento, es decir, si son suelos de compresibilidad baja o media, se añade al símbolo genérico la letra L (LOW - COMPRESSIBILITY), obteniéndose por esta combinación los grupos siguientes:

a).-GRUPO ML:

Se trata de limos inorgánicos de baja o media compresibilidad.

b).-GRUPO CL:

Se trata de arcillas inorgánicas de baja o media compresibilidad.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

c). -GRUPO OL:

Se trata de limos y arcillas orgánicas de baja o media compresibilidad.

Los suelos finos con límite líquido mayor del cincuenta por ciento, o sea, de alta compresibilidad, llevan tras el símbolo genérico la letra H (HIGH COMPRESSIBILITY), teniéndose de esta manera los siguientes grupos:

d) GRUPO MH:

Corresponde a limos inorgánicos de alta compresibilidad.

e) GRUPO CH:

Corresponde a las arcillas inorgánicas de alta compresibilidad.

f) GRUPO OH:

Corresponde a limos y arcillas orgánicas de alta compresibilidad.

A las gravas y las arenas principalmente se les conoce como materiales friccionantes; entendiéndose por fricción interna a la resistencia al desplazamiento entre las partículas internas del material; a las arcillas y limos arcillosos se les agrupa generalmente como materiales cohesivos; donde la cohesión podemos definirla como la atracción mutua de las partículas de un suelo debido a fuerzas moleculares y la presencia de humedad.

IDENTIFICACION DE SUELOS GRUESOS EN CAMPO.

Estos tipos de suelo, se identifican en campo sobre una base visual principalmente. Para este fin, se extiende una muestra de suelo seco sobre una superficie plana, de tal manera que pueda juzgarse, de manera aproximada claro está,

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

el tamaño de sus partículas, su graduación, su composición mineralógica y forma.

Usando medio centímetro con equivalente de la malla No. 4 se puede hacer una distinción entre las gravas y las arenas y para distinguir el contenido de finos, es suficiente considerar que las partículas que corresponden a la malla No. 200 son las partículas más pequeñas que son apreciables a simple vista.

Para distinguir entre un suelo bien graduado y uno mal graduado se requiere una amplia experiencia basada en las comparaciones de graduaciones obtenidas de un examen visual, con las obtenidas en el laboratorio.

Puede resultar importante analizar la integridad de las partículas que constituyen el suelo en cuestión. Las partículas procedentes de rocas ígneas sanas son fácilmente identificables y las intemperizadas se reconocen por la relativa facilidad con que se desintegran y por su decoloración.

IDENTIFICACION DE SUELOS FINOS EN CAMPO.

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos tiene como ventaja la identificación de suelos finos en campo, pero no debe olvidarse que la experiencia es un factor muy importante en esta tarea.

El criterio de identificación de suelos finos en campo está basado en la investigación de las características de dilatancia, tenacidad y resistencia en estado seco. Para suelos orgánicos, el olor y el color de estos es particularmente útil.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

CAPITULO 3

PROCEDIMIENTO DE COMPACTACION. FACTORES QUE INTERVIENEN Y SUS PRUEBAS DE LABORATORIO.

La compactación es el proceso mecánico por medio del cual se reduce el volumen de los materiales en un tiempo relativamente corto con el fin de que sean resistentes a las cargas y tengan una relación esfuerzo-deformación conveniente, durante la vida útil de la obra. También puede decirse que se trata de un aumento artificial por medios mecánicos del peso volumétrico de un suelo, esto se logra a costa de la reducción de los vacíos, al conseguir un mejor acomodo de las partículas que los forman mediante la expulsión de aire y agua o ambos del material.

En la terminología de la mecánica de suelos, la reducción de sus vacíos recibe varios nombres: consolidación, compactación, densificación, etc., existen ligeras diferencias en el significado de los dos primeros. El término consolidación se utiliza para la reducción de vacíos de manera relativamente lenta, debido a la aplicación de una carga estática, usualmente acompañada por la expulsión de agua del suelo, como se puede observar en un suelo que está bajo un edificio.

El término compactación se utiliza para la reducción de vacíos, más o menos rápida producida por medios mecánicos durante el proceso de construcción. (Figura No.1)

Al producirse los vacíos del suelo hay un incremento en el peso volumétrico del material como se define anteriormente.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

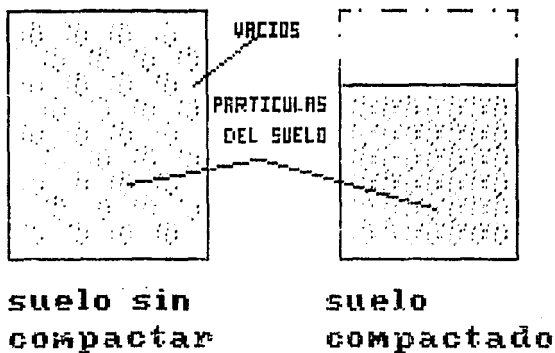


FIGURA No.1

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

La compactación tiene como propósito, estabilizar y mejorar las características en un suelo en lo referente a su resistencia mecánica, resistencia a los asentamientos bajo cargas futuras e impermeabilidad.

Las carreteras, las aeropistas y las presas de tierra se pueden señalar entre las obras que requieren compactación como las más importantes. Estas estructuras deberán ser capaces de soportar su propio peso y el peso de las cargas superimpuestas, si ocurre algún tipo de falla en alguna de estas estructuras, el costo de las reparaciones requeridas puede resultar sumamente elevado de ahí la importancia en el control de la compactación.

Desde el punto de vista del constructor el problema de la compactación estriba en obtener la densidad especificada por el diseñador. Al obtenerse esta densidad se asegura que la resistencia a futuros asentamientos y la impermeabilidad sean las supuestas por el diseñador. Sin embargo, la obtención de la densidad de diseño no necesariamente asegura la resistencia mecánica supuesta, ve que ésta depende en muchos suelos de la humedad a la cual fue compactada.

Es necesario entonces, que la compactación sea efectuada a la humedad especificada, especialmente para suelos cohesivos.

Cabe hacer notar que compactar a mayores grados de lo especificado no es conveniente, es decir, compactar más puede resultar perjudicial al proyecto, por que si bien es cierto, que una compactación intensa o mayor que la del diseño produce un material muy resistente, es cierto también que el material resultante es más susceptible al agrietamiento, sin tomar en cuenta de que esta compactación más alta se lo gre con un incremento considerable en los costos.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

Para evitar la falla en las obras y su ocurrencia en algunas otras, los diseñadores se han visto obligados a que las especificaciones de compactación sean cada vez más estrictas; Las tolerancias en más o menos del grado de compactación especificado son generalmente fijadas desde el inicio de la obra.

Para llevar al cabo el proceso de compactación se requiere aplicar una cierta energía al suelo, con lo cual se le transmiten a éste esfuerzos de compresión mediante cualquiera de las formas que se enumeran a continuación y que se verán con más detalle posteriormente.

- a) Compactación por presión estática.
- b) Compactación por impacto.
- c) Compactación por vibración.
- d) Compactación por amasamiento.
- e) Compactación mixta.

Estas formas de compactación se diferencian por la naturaleza de los esfuerzos aplicados y por la duración de los mismos.

Para comprender mejor esta transmisión de los esfuerzos de compresión en un suelo consideremos como ejemplo, una placa rígida circular de área "A" colocada sobre un suelo a la cual se le aplica una carga "L" dando una presión de contacto "P". (Figura No.2)

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

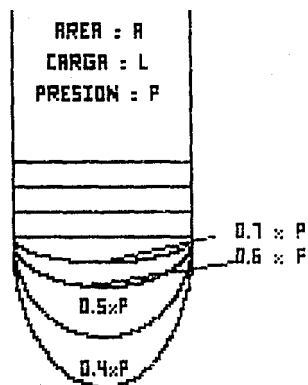


FIGURA No.2

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

En el suelo se desarrollan presiones, si unimos los puntos de igual presión podremos obtener superficies llamadas bulbos de presión.

De las figuras anteriores podemos observar lo siguiente:

1. Si aumenta el tamaño de la placa, es decir el área de contacto "A", pero la presión permanece constante incrementando la carga, la profundidad del bulbo de presión aumenta. (Figura No.3).
2. Si aumenta la presión y el área de contacto permanece constante, la profundidad del bulbo de presión no aumenta significativamente, pero la presión y por lo tanto la energía de compactación sí aumenta. (Figura No.4).

Si consideramos un cierto equipo de compactación trabajando capas de un determinado espesor se puede deducir que:

De (1) y (2) que es necesario controlar el espesor para tener suficiente presión en el suelo, para conseguir la compactación deseada.

De (2) se deduce que no debemos aumentar significativamente el espesor de la capa de compactación por el solo hecho de lastrar excesivamente el equipo. Y si queremos aumentar el espesor de la capa de compactación, de (1) se deduce que debemos cambiar el equipo por otro que tenga una mayor superficie de contacto aunque la presión permanezca constante.

La teoría de los bulbos de presión fué desarrollada por Boussinesq para un medio elástico. Para fines prácticos todos los suelos son elásticos y entonces la teoría resulta ser razonablemente cierta aún para los suelos granulares.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

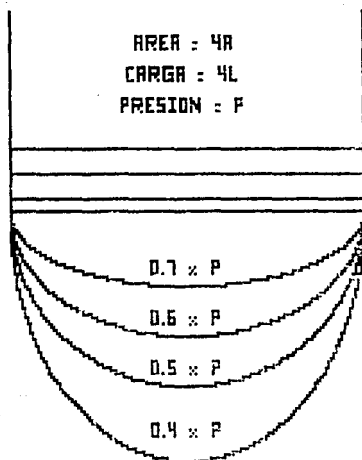


FIGURA No.3

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

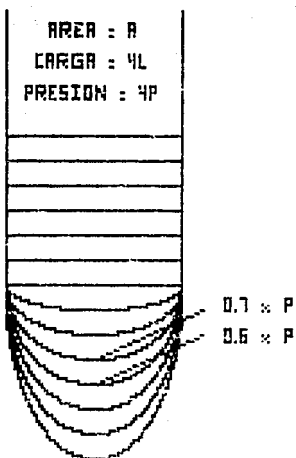


FIGURA No.4

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

De las formas de aplicación de energía de compactación se puede decir que la compactación por amasado, por presión estática y por impacto son las formas de aplicación de energía utilizadas comúnmente en los métodos convencionales desde hace varias décadas. La compactación por vibración es una técnica de implantación más reciente pero no por ello menos popular en los últimos años. Como es obvio, estas formas no representan todas las maneras posibles de entregar energía de compactación a un suelo pero si son las soluciones comerciales desarrolladas hasta el momento para resolver el problema.

En el proceso de compactación: como se mencionó anteriormente intervienen factores que influyen en la obtención de una compactación adecuada y económica. Estos factores son los siguientes:

1. Naturaleza del suelo. (Granulometría del material).
2. Contenido de humedad del material.
3. Energía específica.
4. Peso del compactador.
5. Presión de contacto.
6. Velocidad del equipos.
7. Espesor de Capa.
8. Número de pasadas del equipo.

1. NATURALEZA DEL SUELO (GRANULOMETRIA DEL MATERIAL).

Resulta evidente que la clase de suelo con la que se trabaje influye de manera decisiva en el proceso de compactación, ya que ésta decidirá los resultados que se obtengan de acuerdo con la técnica o técnicas empleadas en base al tipo de suelo.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

Para el análisis de los procesos de compactación es conveniente hacer la distinción entre suelos finos y gruesos o entre suelos arcillosos y friccionantes, tal distinción se hace comúnmente más detallada en base a las normas existentes que se establecen en el capítulo 2.

Para obtener una compactación más eficiente es necesario que haya partículas de varios tamaños en el material por compactar, ya que de esta manera las partículas de menor tamaño ocuparan los espacios formados entre las partículas de mayor tamaño.

Un material que contenga partículas de un solo tamaño será difícilmente compactado; sólo a través de un enérgico esfuerzo de compactación que provoque la fragmentación de las partículas podrá ser densificado.

Es oportuno hacer notar aquí, que la forma de las partículas también tiene importancia en la compactación ya que los materiales con partículas de forma angulosa son generalmente más fácilmente compactados por sus acuñamientos, que los materiales con partículas redondeadas que no permiten dichos acuñamientos.

2. CONTENIDO DE HUMEDAD DEL MATERIAL.

El agua tiene en el proceso de compactación, el papel de lubricante entre las partículas del material. Una falta de humedad exigirá mayor esfuerzo de compactación, así como también exigirá un exceso de la misma. Debe recordarse que todo material tiene un contenido óptimo de humedad, para el cual se obtiene bajo cierta energía de compactación una densidad máxima.

De manera que el agua es una variable fundamental en el proceso de compactación. Según observaciones de Proctor, se pone de manifiesto que cuando se incrementan los contenidos de agua paulatinamente y partiendo de valores bajos, se obtienen pesos específicos secos más altos usando

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

la misma energía de compactación: sin embargo se observó también, que este incremento en el peso específico seco no se mantiene indefinidamente, ya que cuando la humedad rebasa cierto valor, disminuyen los pesos específicos secos que se habían obtenido. Consecuentemente Proctor observó que para un determinado tipo de suelo y procedimiento de compactación, existe un contenido de agua de compactación conocido como óptimo.

En un determinado proceso de compactación de campo el contenido de humedad óptimo es para un cierto equipo y su energía correspondiente .

En un suelo fino arcilloso y con bajo contenido de agua, esta última se encuentra en forma capilar, de tal manera que ejerce compresiones entre las partículas constituyentes del suelo y forman de esta manera grumos, los cuales no son fácilmente desintegrables y por lo tanto hacen más difícil lograr que el trabajo de compactación sea el satisfactorio. De manera que al aumentar el contenido de humedad, el agua actúa como un lubricante entre las partículas del suelo disminuyendo la tensión capilar y por consecuencia la formación de dichos grumos aglutinados, con lo que se mejora considerablemente la eficiencia en la aplicación de la energía de compactación.

Pero como se mencionó anteriormente, el exceso de agua libre podría llenar los vacíos que existen entre las partículas impidiendo que el agua salga o se desplace instantáneamente debido al efecto mecánico que se aplica en ese momento y por lo tanto impide una buena compactación. Por esta razón, el contenido de agua del suelo es una de las variables fundamentales en el proceso de compactación.

3. ENERGIA ESPECIFICA.

Se entiende por energía específica de compactación a aquella que se proporciona al suelo por cada unidad de volumen durante el proceso mecánico de que se trate.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

Generalmente en pruebas de laboratorio, resulta relativamente sencillo evaluar la energía específica con solo someter un determinado suelo al proceso de compactación mediante impactos proporcionados por un pisón. Para este caso dicha energía estará dada por la siguiente expresión:

$$E_s = \frac{N n W h}{V}$$

en donde:

E_s = energía específica.

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

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

W = peso del pisón compactador.

h = altura con la que se deja caer el pisón al suelo.

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

Cuando se evalúa la energía específica en laboratorio, se puede medir ésta de manera análoga si se está aplicando en ese caso una presión estática y en términos del tamaño del molde, número de capas, presión aplicada y el tiempo en el que se aplica dicha presión. Pero la energía específica es afectada por la deformabilidad del suelo y por lo tanto, la evaluación ya no resulta tan fácil de lograr, además el tiempo de aplicación de la presión también dificulta esta tarea.

Y si la compactación se lleva a cabo por amasamiento es aún más difícil la evaluación de la energía específica, ya que cada capa de suelo se compacta mediante un cierto número de aplicaciones de carga con un pisón que produce presiones que varían gradualmente desde cero hasta un valor máximo y luego se invierte el proceso en la descarga.

De manera que la energía de compactación no se puede cuantificar de forma sencilla pero puede hacerse variar si se juega adecuadamente con las variables implicadas. Por

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

otra parte, es importante tener en cuenta que la energía específica conserva su valor cuando se relaciona con procedimientos de compactación de campo.

4. PESO DEL COMPACTADOR.

La presión ejercida sobre el material dependerá en parte del peso propio del equipo de compactación. Este variará también según las características de cada equipo y para cada proceso.

5. PRESION DE CONTACTO.

Más que el peso del compactador, importa la presión de contacto, ésta depende de:

- a) Tipo de material.
- b) Estado del material (suelto o semicompacto).
- c) Area expuesta por el compactador.
- d) Presión de inflado de los neumáticos, en el caso de que el equipo los tenga.
- e) Peso del compactador.
- f) Temperatura del material, en el caso de que se tratase de mezclas asfálticas.

Los fabricantes de equipos de compactación se han preocupado porque sus maquinas ejerzan presiones de contacto uniformes, lo cual han resuelto mediante suspensiones isostáticas.

Es importante y pertinente insistir en que resulta de mayor importancia la presión de contacto de un compactador que el peso del mismo. Por ejemplo un compactador muy pesado necesita de un mayor número de llantas o de llantas más grandes, con lo cual el área de contacto entre el compactador y el material se incrementa resultando la presión de contacto similar a la de un compactador con menos llantas o llantas menores.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

6. VELOCIDAD DEL EQUIPO.

De la velocidad de traslación del compactador y del número de pasadas del mismo dependerá la habilidad de producción de un determinado equipo.

El equipo de compactación debe ser de una eficiencia tal que no interfiera con el equipo de depósito de material que es un equipo más veloz que el compactador. Esto puede provocar, si se diera el caso, retrasos en la ejecución de la obra con lo que se podría ocasionar un desajuste en los programas de actividades influyendo directamente en los costos de la obra.

La maniobrabilidad del equipo compactador influye definitivamente en la velocidad del equipo.

7. ESPESOR DE CAPA.

El espesor de capa por compactar dependerá esencialmente de:

- a) Tipo de material.
- b) Humedad en el material.
- c) Tipo de compactador.
- d) Grado de compactación especificado.

Para determinar cual es el espesor de capa de un cierto material a compactar con un equipo determinado, se puede hacer referencia al método del bulbo de presiones de Boussinesq.

Suponiendo que se quiere compactar con un determinado equipo un cierto material que con una presión de 2.7 Kg/cm^2 se densifica correctamente, tratemos de encontrar el espesor de capa adecuado.

Si sabemos que:

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

la presión es = FUERZA/AREA

Y suponemos un área de contacto circular entonces:

$$A = 3.14 e^2$$

La fuerza será el peso por llanta del compactador y la llamaremos F.

La presión de contacto es:

$$P_o = F/3.14 e^2$$

despejando e de la expresión anterior se tiene:

$$e = \sqrt{(F/3.14 P_o)}$$

Y suponiendo $F = 1800 \text{ Kg/cm}^2$ y $P_o = 9 \text{ Kg/cm}^2$ se tiene:

$$e = \sqrt{(1800/3.14 \times 9)} = 7.9808688 \approx 8.00 \text{ cm.}$$

Recurriendo a los factores de influencia para diferentes profundidades de la teoría de Boussinesq se obtiene:

Profundidad	Factor de influencia	Presión
e=8 cm.	$P_1=0.6 P_o$	$P_1=5.4 \text{ kg/cm}^2$
2e=16 cm.	$P_2=0.3 P_o$	$P_2=2.7 \text{ kg/cm}^2$
3e=24 cm.	$P_3=0.15 P_o$	$P_3=1.35 \text{ kg/cm}^2$
4e=32 cm.	$P_4=0.09 P_o$	$P_4=0.81 \text{ kg/cm}^2$

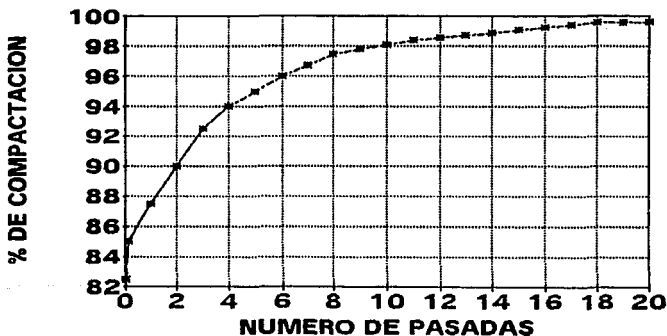
De lo anterior se concluye que para un material que requiere 2.7 kg/cm^2 de presión para ser compactado eficientemente con un compactador de 1800 kilogramos de carga por rueda y una presión de contacto de 9 kg/cm^2 se puede usar un espesor de capa de 16 cm.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

8. NUMERO DE PASADAS DEL EQUIPO.

El número de pasadas que un equipo deba dar sobre un material dependerá de:

- Tipo de compactador.
- Tipo de material.
- Contenido de humedad del material.
- Forma en que se aplica la presión al material.
- Maniobrabilidad del equipo.



COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

PRUEBAS DE LABORATORIO.

En la construcción de terraplenes sería ideal poder medir la resistencia del suelo para determinar cuándo se ha alcanzado la resistencia necesaria, pero el equipo necesario para medir esta resistencia (especialmente a esfuerzos de compresión y cortante) es difícil de manejar, es caro y no es aplicable a todos los tipos de suelos, por lo tanto se han preparado las siguientes pruebas de laboratorio.

- A) Práctor
- B) Práctor Modificada
- C) Párter
- A) Práctor.

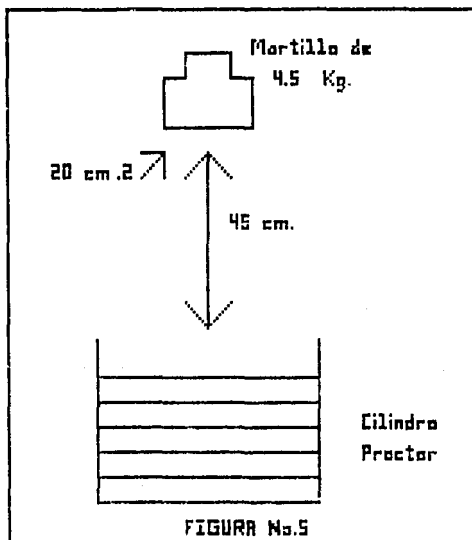
R.R. Proctor estableció que hay una correspondencia entre el peso volumétrico seco de un suelo compactado y su resistencia. El equipo para hacer pruebas de compactación en la obra es un equipo económico y sencillo. Esta prueba que Proctor desarrolló y que lleva su nombre consiste en:

- a) Se toma una muestra representativa del suelo a compactar de humedad conocida.
- b) Se toma un cilindro de 4" de diámetro por 4 1/2" de altura. se llena con tres capas aproximadamente iguales con el material de prueba.
- c) Cada capa se compacta con 25 golpes de un martillo de 2.5 kg con un área de contacto de 20 cm², el que se deja caer de 35 cm de altura. Todo esto con el objeto de siempre dar al material la misma energía de compactación, como se muestra en la figura No.5.
- d) Se pesa el material y como el volumen es conocido se calcula el peso volumétrico húmedo, simplemente dividiendo el peso del material entre su volumen. Como la humedad es

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

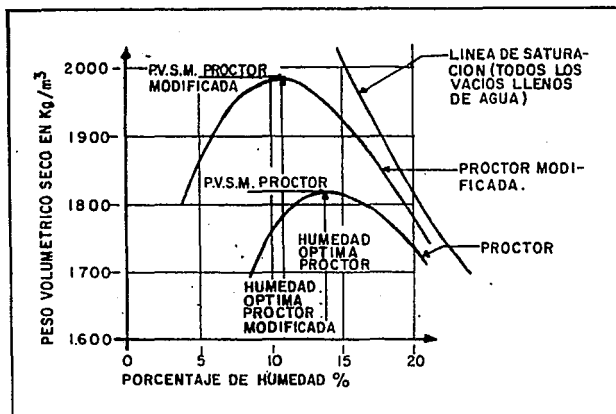
conocida, se resta el peso del agua y se obtiene de esta manera el peso volumétrico seco para esa humedad.

e) Se repite la prueba varias veces, variando cada vez el grado de humedad, con lo que se obtienen pares de valores Humedad-Peso Volumétrico Seco.



COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

Con estos pares de valores se dibuja la siguiente gráfica.



Fuede observarse que hay un cierto contenido de humedad para el cual el peso volumétrico es máximo, este peso se conoce con el nombre de "Peso Volumétrico Seco Máximo" (P.V.S.M.), o peso próctor y al contenido de humedad correspondiente como humedad óptima.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

El diseñador entonces especifica el porcentaje del peso próctor que debe obtenerse en la construcción del terraplén y la humedad óptima.

Por ejemplo: Si el proyectista especifica 95 % Proctor en el caso de la gráfica, tenemos: P.V.S.M. = 1820 kg/m³

$$95 \% \text{ de P.V.S.M.} = 0.95 \times 1820 = 1729 \text{ kg/m}^3$$

Es decir, el constructor debe obtener un peso volumétrico seco mínimo de 1729 kg/m³ en ese material.

La razón de la existencia de un peso volumétrico máximo es que en todos los suelos, al incrementarse su humedad se les proporciona un medio lubricante entre sus partículas, que permite un cierto acomodo de éstas cuando se sujetan a un cierto trabajo de compactación. Si se sigue aumentando la humedad, con el mismo trabajo de compactación, se llega a obtener un mejor acomodo de sus partículas y en consecuencia un mayor peso volumétrico, pero si aún se aumenta más la humedad, el agua empieza a llenar el espacio que deberían ocupar las partículas del suelo y por lo tanto comienza a bajar el valor del peso volumétrico del material, para el mismo trabajo de compactación.

B) Próctor Modificada

Conforme fueron aumentando las cargas sobre las terracerias por el uso de camiones y aeroplanos cada vez más pesados, se vio la necesidad de desarrollar mayores densidades y resistencias en muchos materiales usando mayor trabajo de compactación. Por esta razón se desarrolló la prueba Próctor Modificada.

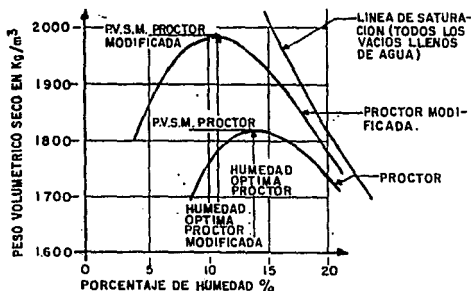
Esta prueba utiliza el mismo cilindro que se usa en la prueba Próctor, pero el material se compacta en 5 capas con un martillo de 4.5 kg, el cual se deja caer desde una

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

altura de 46 cm., dándole al material 25 golpes por cada capa, como se muestra en la figura No.6.

En todos los aspectos las dos pruebas son semejantes, Únicamente difieren en que en la prueba próctor modificada el trabajo de compactación se incrementado aproximadamente 4.5 veces.

La gráfica siguiente es un ejemplo de la prueba Próctor y la prueba próctor modificada efectuadas en el mismo material.



Obsérvese en la gráfica anterior que aunque el trabajo de compactación se ha incrementado 4.5 veces, la densidad solamente se incrementó 9 %, y que la humedad óptima disminuyó 3 %. Lo anterior resulta ser invariablemente cierto.

C) Pórtor

Tanto la prueba próctor como la prueba Próctor Modificada han dado buen resultado en suelos cuyos tamaños máximos son de 10 mm (3/8"), en suelos con partículas mayores el golpe

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

del martillo no resulta uniforme y por lo tanto la prueba puede variar de resultados en un mismo material.

La prueba Pórtér se ideó para hacer obvia esta dificultad y consiste en los siguientes pasos.

a) Se toma una muestra del material a probar y se seca.

b) Se pasa por la malla de 25 mm. (1") y se determina el porcentaje en peso retenido en la malla; si el porcentaje es menor del 15 %, se usará para la prueba el material que pasa la malla. Si el porcentaje retenido es mayor del 15 % se prepara; del material original, una muestra que pase la malla de 1" y que sea retenida en la malla No. 4. De esta muestra se pesa una cantidad igual al peso del material retenido, éste se agrega al material que pasó la malla de 1". Con este nuevo material se procede a la prueba.

c) A 4 kg de la muestra preparada de la manera antes mencionada se le incorpora una cantidad de agua conocida y se homogeniza con el material.

d) Con este material se llena, en tres capas, un molde metálico de 6" de diámetro por 8" de altura con el fondo perforado. Cada capa se pica 25 veces con una varilla de 5/8" (1.9 cm.) de diámetro por 30 cm. de longitud con punta de bala.

e) Sobre la última capa se coloca una placa circular ligeramente menor que el diámetro interior del cilindro y se mete el molde en una prensa de 30 toneladas.

f) Se aplica la carga gradualmente de tal manera que en cinco minutos se alcance una presión de 140 kg/cm^2 , la cual debe mantenerse durante un minuto. Si al llegar a la carga máxima no se humedece la base del molde, la humedad ensayada es inferior a la humedad óptima.

g) Se prosigue por tanteos hasta que la base del molde se humedezca al alcanzar la carga máxima. La humedad de esta prueba es la humedad óptima. Se determina entonces el peso volumétrico seco de la muestra dentro del cilindro, a este peso se le conoce como el "Peso Volumétrico Seco Máximo Pórtér" y será el peso comparativo para el trabajo de campo.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

Por ejemplo: si en la prueba Porter obtuvimos un Peso Volumétrico Seco Máximo de 2000 kg/m³ y el diseñador ha pedido el 95 % Porter en la obra, tendremos que alcanzar un peso volumétrico seco de:

$$0.95 \times 2,000 = 1,900 \text{ kg/m}^3.$$

MÉTODOS DE CONTROL

Para medir en la obra si se ha alcanzado el peso volumétrico especificado existen varios métodos de control.

- A) Medida física de peso y volumen
- B) Mediciones nucleares
- C) Otros

A) Medida física de peso y volumen:

En cualquiera de los métodos existentes el principal problema radica en la determinación de la humedad para poder calcular el peso volumétrico seco en función del peso volumétrico húmedo que es el que se obtiene en las pruebas de campo. Normalmente se calienta una parte del material hasta secarlo y por diferencia de pesos se obtiene la humedad, pero este método es lento y peligroso porque en algunos suelos se altera el peso volumétrico con el calentamiento debido a la evaporación de partes orgánicas principalmente. Nunca debe llegarse a la calcinación que también puede alterar el peso volumétrico. El método de medición física de peso y volumen consiste en:

- a) Se excava un agujero de 10 a 15 cm. de diámetro o un cuadrado de 15 cm. por lado, a la misma profundidad de capa por probar.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

b) El material excavado es cuidadosamente recogido y pesado. Se seca para determinar la humedad y el peso volumétrico seco.

c) El volumen del agujero es medido. El método usado generalmente es llenándolo con una arena de peso volumétrico constante que se tiene en un recipiente graduado.

d) Conocidos el peso seco de la muestra y el volumen del agujero, se calcula el peso volumétrico seco de la muestra, que debe ser igual o mayor que el peso volumétrico seco especificado.

B) Prueba de medición nuclear:

Para evitar el tiempo y costo que significa la prueba anterior se han ideado varios métodos, uno de ellos es el Método Nuclear, que consiste en un bloque de plomo que contiene un isótopo y un tubo Geiger como se muestra en la siguiente figura.

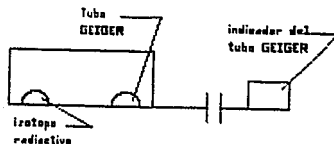


FIGURA No. 8

El bloque de plomo se coloca sobre la capa de suelo a probar, el número de partículas que llegan al tubo geiger está en función de la masa del material que tienen que atravesar, es decir, es función del peso volumétrico, entonces la medida del indicador debe compararse con otra medida hecha en una capa que tenga el peso volumétrico especificado.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

Estos aparatos necesitan que se les verifique frecuentemente la calibración, no siempre hay una indicación clara de cuando el aparato no funciona bien y su exactitud varia con el suelo.

Estas desventajas, sin embargo son despreciadas por los constructores en grandes trabajos de terracerías, pues el aparato les permite asegurar que una cierta capa ha sido compactada, con un alto grado de confiabilidad, prosiguiendo el trabajo de inmediato con la siguiente capa.

C) Otros

Como el problema principal es la determinación de la humedad, se han desarrollado últimamente algunos métodos entre los que destaca principalmente el denominado "Speedy", que consiste en colocar un peso conocido de suelo mezclado con carburo de calcio dentro de un recipiente hermético provisto de un manómetro. El carburo reacciona con la humedad del suelo, produciendo gas acetileno y por lo tanto una presión que es registrada en el manómetro el que se puede inclusive graduar en gramos de agua, determinándose rápidamente de esta manera el porcentaje de humedad, y así poder calcular su peso volumétrico seco.



FIGURA No. 3

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

CAPITULO 4

TRABAJO DEL EQUIPO DE COMPACTACION.

Como se mencionó en el capítulo anterior, existen diversas maneras de transmitirle a un suelo una cierta cantidad de energía y por lo tanto un esfuerzo de compresión. De acuerdo con cada forma de transmisión de esfuerzos de compresión se provocará un trabajo de compactación más o menos eficiente para un cierto tipo de suelo.

Estas formas de transmisión de energía a un suelo son:

- a) Compactación por presión estática.
- b) Compactación por impacto.
- c) Compactación por vibración.
- d) Compactación por amasamiento.
- e) Compactación mixta.

a) Compactación por presión estática.

La compactación por presión estática se basa en la aplicación de una fuerza por unidad de área y es la aplicación de pesas más o menos grandes sobre la superficie del suelo. La acción de este principio de compactación es de arriba hacia abajo, es decir, las capas superiores alcanzan primero mayores densidades que las capas inferiores.

Este principio de compactación tiene dos inconvenientes en la obtención de una rápida densificación:

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

1) Su acción de arriba hacia abajo.

El inconveniente de que la parte superior se compacte primero que la de abajo, es que el esfuerzo compactivo debe atravesar la parte ya compactada para poder compactar la inmediata inferior, se consume por lo tanto mayor energía de compactación.

También suele suceder que las características granulométricas del material varien debido a la sobrecompactación o exceso de energía compactiva, produce una fragmentación de las partículas del material.

2) Fomenta la resistencia de la fricción interna del material durante el proceso de compactación; definiendo o mejor dicho entendiendo como fricción interna a la resistencia de las partículas de un suelo, para deslizarse dentro de la masa del mismo, se puede juzgar este segundo inconveniente.

Si le llamamos (F) a la fuerza aplicada por el compactador y (n) al coeficiente de la fricción interna del material, se puede deducir que la reacción (R) de las partículas para deslizarse dentro de la masa de suelo será:

$$R = n F$$

Por lo tanto, se tiene que a mayor fuerza aplicada por el equipo de compactación, mayor será la reacción de la fricción interna del material. Es aquí, donde se puede ver la importancia del agua en el proceso de compactación, ya que esta tendrá efectos lubricantes entre las partículas del material, reduciendo de esta manera el coeficiente de fricción (n) y por consecuencia la reacción (R). De manera que para este tipo de compactación será necesario hacer riegos intensivos de agua, cuando el material lo soporte.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

b) Compactación por impacto.

En la compactación por impacto, la transmisión de esfuerzos, está dada por el golpeo de una carga de corta duración, y baja frecuencia. Esto se logra haciendo caer un peso desde una cierta altura.

El principio en que se basa este tipo de compactación es que, cuando un cuerpo se levanta a una cierta distancia sobre una superficie y se deja caer, la presión que ejerce sobre la superficie es varias veces mayor que la que ejerce el mismo cuerpo estando apoyado estáticamente sobre dicha superficie.

Los diferentes tipos de pisonos, se encuentran clasificados dentro de este grupo, pero su utilización está limitada a pequeñas áreas. También algunas clases de rodillos apisonadores del tipo Tamper semejantes a los rodillos pata de cabra, que se detallarán más adelante. Los rodillos apisonadores son capaces de operar a velocidades mucho mayores que los rodillos pata de cabra, lo que produce un efecto de impacto sobre la capa de suelo que se compacta.

El inconveniente es que con el impacto se produce una fractura, a veces severa, en las partículas de suelo.

c) Compactación por vibración.

Este principio de compactación es el que últimamente ha tenido mayor desarrollo; prácticamente ha invalidado todos los otros tipos de compactación.

En la mayoría de los tipos de material, la compactación dinámica o vibratoria, supera en eficiencia a los compactadores estáticos.

Como en la compactación por presión estática, aquí también se aplica una cierta presión, pero al mismo tiempo se somete al material a sacudidos y fuertes impactos o vibraciones, entre 700 y 4000 dependiendo del compactador.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

Debido a las vibraciones producidas por el equipo sobre el material, la fricción interna de este desaparece momentáneamente, propiciando el acomodo de las partículas.

Esto se puede demostrar mediante el experimento de girar una perforadora de álabes dentro de un recipiente que contenga arena o grava, primero en estado estático y luego colocando el recipiente sobre una placa vibratoria.

La vibración multiplica la movilidad interna del material en forma contundente; en suelos cuya granulometría es gruesa, la movilidad dinámica es de 10 a 30 veces mayor que la movilidad estática.

La experiencia sueca nos proporciona la siguiente tabla:

Material	Contenido de agua %	Momento resistivo (Kg-Cm)	
		En reposo	Con vibraciones
Grava	0	1700	40
Arena	10	600	45
Lima	12	150	25

La compactación por vibración tiene un efecto de penetración semejante al del sonido, el cual también es dinámico, pero tiene una frecuencia mayor y audible; este tipo de compactación evita los efectos de arco y disminuye la fricción interna del material permitiendo que las fuerzas compactivas trabajen a mayor profundidad y en ancho mayor.

Con este principio de compactación las partículas de material se ven sujetas a presión estática y a impulsos dinámicos de las fuerzas vibratorias, con lo cual se logra una compactación con menor esfuerzo.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

El mecanismo empleado para la compactación por impacto puede ser del tipo de masas desbalanceadas o del tipo hidráulico pulsativo que proporciona un efecto vibratorio al elemento compactador. Como se mencionó anteriormente la frecuencia vibratoria influye terminantemente en el proceso de compactación y se ha podido observar que existe un intervalo óptimo para dicha frecuencia, que se encuentra comprendido entre 0.5 y 1.5 veces la frecuencia natural del suelo, lo cual indica que debe funcionar a una frecuencia práctica del orden de 1500 a 2000 ciclos por minuto.

Existen factores ligados a la naturaleza misma de la vibración que influyen de manera importante en el rendimiento de los equipos, principalmente los siguientes:

- 1) El número de revoluciones por minuto del oscilador, es decir la frecuencia.
- 2) La amplitud, o sea la distancia vertical.
- 3) El empuje dinámico que se genera en cada impulso del oscilador.
- 4) El peso del equipo o carga muerta.
- 5) La forma y tamaño del área de contacto del vibrador con el suelo.
- 6) La estabilidad de la máquina.

El elemento compactador propiamente dicho lo constituyen placas, rodillos o reglas.

Ventajas de la compactación por vibración:

- I. Es posible compactar a más altas densidades; facilita la obtención de los últimos porcentos del grado de compactación, que a veces resultan difíciles de conseguir y en muchos casos imposibles, con compactadores estáticos.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

- II. Permite el uso de compactadores mas pequeños.
- III. Se puede trabajar sobre capas de material de mayor espesor.
- IV. Permite hacer trabajos más rápidos por el hecho de darle un menor número de pasadas al material.
- V. Y debido a las razones anteriores, los costos de compactación resultan más económicos.

D) Compactación por amasamiento.

Amasar en este caso puede confundirse con exprimir es decir, el efecto de una pata de cabra, estos compactadores concentran su peso sobre un área de contacto relativamente pequeña de todo un conjunto de puntas que puede tener diversas formas provocando grandes presiones estáticas en los puntos donde penetran en el suelo las mencionadas puntas. La compactación por este principio se lleva a cabo de abajo hacia arriba, es decir, las capas inferiores se densifican primero y las superiores posteriormente. A medida que se van dando pasadas con el equipo y el material se va compactando, las patas se hunden cada vez menos hasta que ya no se produce ninguna compactación adicional.

La superficie compactada queda siempre distorsionada a causa de la penetración de las puntas y queda una capa de aproximadamente 6 cm que no recibe una compactación adecuada pero que se compacta posteriormente con el tendido de la siguiente capa.

La presión que ejerce un rodillo pata de cabra al pasar con sus vástagos sobre el suelo no es uniforme en el tiempo: los vástagos penetran en el suelo ejerciendo presiones crecientes las cuales llegan a un máximo en el momento en el que el vástago se encuentra en posición vertical y en su máxima penetración, posteriormente la presión disminuye hasta que el vástago sale.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

En las primeras pasadas los vástagos y parte del tambor penetran en el suelo, lo que permite que la presión mayor se ejerza en el lecho inferior de la capa por compactar para que esto ocurra, el espesor de la capa por compactar no debe ser mucho mayor que la longitud del vástago.

El inconveniente de la compactación por amasamiento, es que la superficie compactada siempre queda distorsionada a causa de la penetración de las puntas y además queda una capa de suelo que no recibe una compactación adecuada, pero que se compacta posteriormente con el tendido de la siguiente capa.

Los rodillos que trabajan a base de compactación por amasamiento se emplean fundamentalmente en materiales cohesivos; en cambio su efectividad es casi nula en materiales granulares.

E) Compactación Mixta.

Actualmente se está buscando combinar los efectos de dos o más de los equipos tradicionales aprovechando el alto grado de desarrollo que han tenido dichos sistemas, a fin de alcanzar o lograr una especialización de las acciones que garantice un resultado óptimo para cada caso particular. En ocasiones el uso de una combinación de equipos puede no resultar justificable para una empresa que no tenga un alto grado de diferenciación en los trabajos que lleve a cabo; en algunos otros no se cuenta aún con experiencias suficientes acerca de los propios equipos.

Los equipos principalmente son de presión o vibratorios, como ya se ha mencionado anteriormente; los compactadores de tipo de presión se dividen en máquinas con o sin salientes, y los vibratorios que son los que transmiten ondas dinámicas a los materiales y les producen un acomodo masivo; de estos compactadores, se tienen diferentes tipos, desde placas unitarias, placas en serie, hasta compactadores de tipo manual.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

Recientemente se ha venido usando la compactación de suelos blandos. Esto se logra dejando caer masas de acero de varias toneladas de peso, desde una altura de 15 a 20 metros, pero se debe tener cuidado ya que por lo general los suelos blandos tienen un alto contenido de humedad y para que se obtengan resultados satisfactorios, antes de que se dejen caer las masas en el suelo, se debe reducir el agua de los materiales con alguno de los tipos de drenaje o subdrenaje de que se disponga, de no ser así, la eficiencia será muy baja, en virtud de la lentitud de la presión de poro.

F) Compactación con la ayuda de enzimas.

Mediante la adición de productos enzimáticos en el agua de compactación se ha pretendido obtener, en combinación con algún otro esfuerzo compactador mecánico, la densificación más rápida de los materiales.

Según la definición de Sumner o Somers, una enzima es: "cierta substancia química-orgánica que está formada por plantas, animales y microorganismos, capaz de incrementar la velocidad de transformación química del medio donde se encuentra, sin que sea consumida por ello en este proceso, llegando a formar parte del conjunto".

Según los fabricantes de enzimas para compactación esta se logra mediante una reacción química de ionización de los componentes orgánicos e inorgánicos del terreno, permitiendo que esta reacción origine una fusión molecular progresiva, lo que trae por consecuencia que las partículas del suelo se agrupen y se transformen en una masa compacta y firme.

Se hace hincapié en que al agregar productos enzimáticos al agua de compactación no densificará al material tratado, sino que es necesario aplicar esfuerzo compactivo adicional; es decir, se usará algún equipo compactador y agua con enzimas, con lo cual puede reducirse el tiempo de compactación.

CAPITULO 5.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS.

Equipo de compactación.

Como ya se mencionó con anterioridad, existe una gran variedad de equipos de compactación y la elección y uso de alguno de ellos dependerá de las características de dichos equipos y de las condiciones de trabajo a las que será sometido, es decir, para cada caso particular, las condiciones del trabajo serán distintas ya sea por el tipo de suelo, el método de movimiento de tierras, puede darse la situación, incluso, de que la selección del equipo esté supeditada al operario del que se disponga en la obra, etc.

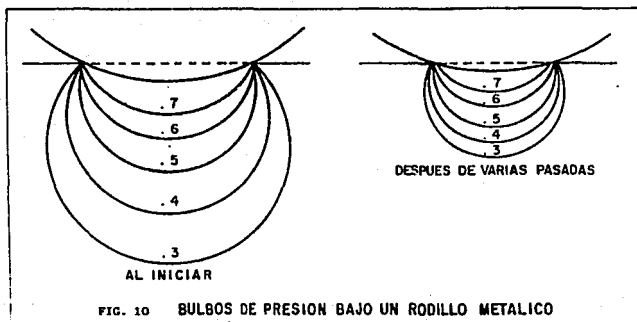
(A continuación se describirán sus características básicas.

1.- RODILLOS METALICOS.

Un rodillo metálico utiliza solamente presión estática con un mínimo de manipulación en materiales plásticos.

Cuando estos rodillos inician la compactación de una capa el área de contacto es más o menos ancha y se forma un bulbo de presión de una cierta profundidad, conforme avanza la compactación, el ancho del área de contacto se reduce y por lo tanto, también se reduce la profundidad del bulbo de presión y aumentan los esfuerzos de compresión en la carcancia de la superficie (figura No.10). Estos esfuerzos son con frecuencia suficientes para triturar los agregados en materiales granulares e invariablemente causan la formación de una costra en la superficie de la capa (encarpetamiento).

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS



COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

Si a esto se agrega la costumbre de hacer riegos adicionales durante la compactación, para compensar la evaporación en una capa en donde la penetración del agua es difícil por la misma compacidad del material, llegaremos a un estado de estratificación de la humedad, es este momento la formación de la costra es inevitable.

También es costumbre más o menos generalizada el sobre lastrar estos equipos cuando no se está obteniendo la compactación para aumentar la penetración y la profundidad del bulbo de presión, esto generalmente tiene como consecuencia el sobre esforzar la superficie.

Un rodillo metálico no compacta pequeñas áreas suaves, debido a que la rigidez de la rueda las "puentea". Estas áreas se presentan con frecuencia en terracerías debido a la irregularidad de la capa.

Dentro de este grupo, se puede hacer la división siguiente:

A) Planchas Tándem.- son aquellas que tienen dos o tres rodillos metálicos paralelos. Los rodillos son generalmente huecos para ser lastrados con agua y/o arena. Tienen generalmente dos números por nomenclatura. El primero es el peso de la máquina sin lastre y el segundo es el peso de la máquina lastrada totalmente.

B) Planchas de tres ruedas.- son quizá de más antiguo diseño; estas planchas tienen dos ruedas traseras paralelas y una rueda delantera; las ruedas pueden ser huecas para ser lastradas o formadas por placas de acero rotadas con atiesadores.

Las planchas tándem, a pesar de que son generalmente de menor peso que las de tres rodillos, suelen tener mayor compresión por centímetro lineal de generatriz que las de tres rodillos, por tener menor superficie de contacto con el material.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

Tanto las planchas tándem como las de tres rodillos, tienen bajas velocidades de operación y poca seguridad al compactar las orillas de terraplenes altos. Son efectivas en suelos de naturaleza granular donde su efecto triturador puede ser necesario, su efectividad se ve mermada en materiales granulo-plásticos, donde se tiende a un encarpetamiento; en materiales plásticos o cohesivos no tienen gran aplicación.

Resumiendo, puede decirse que estas máquinas por su lentitud y poca profundidad de acción, han perdido terreno en la compactación de grandes movimientos de tierra, también en algunas aplicaciones específicas que tienen estos equipos como la compactación de carpetas asfálticas, van siendo desplazadas por otras máquinas compactadoras.

2.- RODILLOS NEUMATICOS.

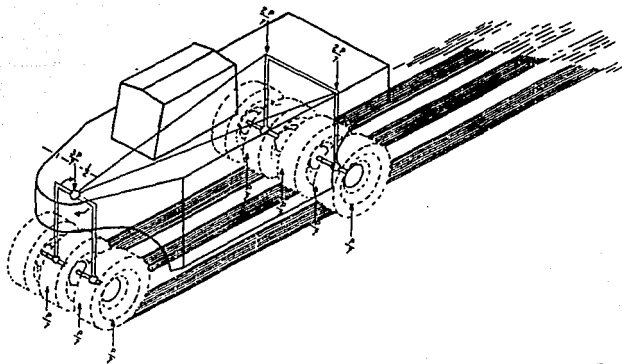
Los rodillos neumáticos son muy eficientes y a menudo esenciales para la compactación de sub-bases, bases y carpetas, sus bulbos de presión son semejantes a los de los rodillos metálicos, pero el área de contacto permanece constante por lo que no se produce el efecto de "puenteo" del rodillo metálico sobre zonas suaves, éste se elimina con llantas de suspensión independiente.

Estos compactadores pueden ser jalados o autopropulsados, se pueden dividir de acuerdo al tamaño de sus llantas en:

- a) De llantas pequeñas.
- b) De llantas grandes.

a) De llantas pequeñas.- generalmente tienen dos ejes en tándem y el número de llantas puede variar entre 7 y 13. El arreglo de las llantas es tal que las traseras traslapar con las delanteras.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS



COMPACTADOR DE NEUMATICOS

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

Algunos de estos compactadores tienen montadas sus ruedas en forma tal que oscilan o "bailan" al rodar, lo que aumenta su efecto de amasamiento.

Estos compactadores proporcionan una presión de contacto semejante a la de equipos de mayor peso y llantas grandes. Tienen mayor maniobrabilidad, no empujan mucho material adelante de ellos, tienen poca profundidad de acción y poca flotación en materiales sueltos.

b) De llantas grandes.- son generalmente arrastrados por tractor y pesan de 15 a 50 toneladas, tienen 4 o 6 llantas en un mismo eje. Su costo horario es generalmente caro por el tipo de tractor que se utiliza para arrastrarlos. Su mejor aplicación es como compactadores de prueba.

Los factores más importantes que intervienen en este tipo de compactadores son:

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

II. La presión de inflado es importante pero está ligada íntimamente a la carga de la llanta. Si "w" es el peso del compactador y "p" es la presión de contacto (figura No.11).

Podemos observar que si aumentamos el peso, sin aumentar la presión aumentamos la profundidad del bulbo (Figura No.12), pero si no aumentamos la presión, esto nos permitirá 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 se aumenta la presión sin aumentar la carga (Figura No.12) disminuimos la profundidad del bulbo de presión y podemos llegar a encarpetar la capa. Esto puede ser eficiente si la capa es delgada como puede serlo en bases y sub-bases.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

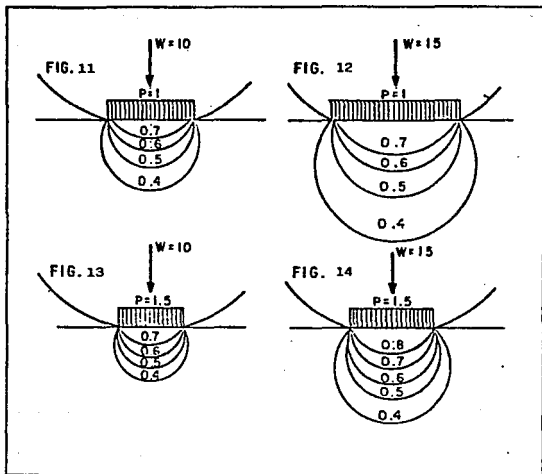
Si aumentamos en peso y la presión (Figura No.14) estamos aumentando la presión efectiva sobre la capa y por lo tanto el trabajo de presión sobre la misma; sin embargo esto nos puede disminuir la vida útil de las llantas y del equipo.

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. Por la anterior razón, los fabricantes de equipo, progresistas han provisto a sus máquinas de implementos para variar rápidamente la presión de inflado de sus equipos.

Las presiones de inflado usuales son del orden de 50 psi, para compactadores pequeños de hasta 10 ton y pueden llegar a 80 psi en compactadores grandes de 10 a 60 ton.

La presión de inflado no es igual a la de contacto ya que por mucno interviene la rigidez de la llanta inflada. Este tipo de compactadores, tienen aplicaciones especializadas como la compactación del terreno natural en aeropuertos (grandes extensiones, terreno plano, alto grado de compactación, fácil acceso, entre otros), son de gran utilidad para sellar las capas superiores, con lo que se logra una buena impermeabilidad.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS



COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

3.- RODILLOS PATA DE CABRA.

Los equipos de compactación de rodillos "pata de cabra", son en la actualidad raramente usados, excepto para amasamiento y compactación de arcillas donde la estratificación debe ser eliminada, como en el corazón impermeable de una presa. Debido a la pequeña área de contacto de una pata y al alto peso de estos equipos de bulbo de presión es intenso y poco profundo.

La compactación se consigue por penetración y amasamiento, más que por efecto del bulbo de presión.

Los rodillos "pata de cabra", se fabrican en diámetros de 40 a 72 pulgadas, con pesos variables entre las 6 000 y las 60 000 libras, cuando se cargan con arena mojada. Hay muchas variaciones en cuanto al ancho del tambor, colocación de las "patas", configuración de éstas, área de contacto, longitudes de los pies y presiones de contacto. Existen en la actualidad modelos autopropulsados, los cuales incrementan la productividad de las operaciones de apisonado con respecto a los modelos anteriores que son remolcados por tractores de orugas o ruedas.

Los rodillos "pata de cabra" dependen del área de contacto de la pata y de su relación con el área total de la periferia, de la pata, de la presión unitaria de contacto y el diámetro del paso del tambor y del tipo de pata para lograr una compactación adecuada. el área de la pata debe ser lo más grande posible, siempre que sea compatible con la adecuada presión unitaria y la separación entre patas para fines de limpieza. La acumulación de material pegajosos sobre y entre las patas, así como el taponado de los limpiadores roca u otros materiales, reducirá la efectividad del esfuerzo compactador.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

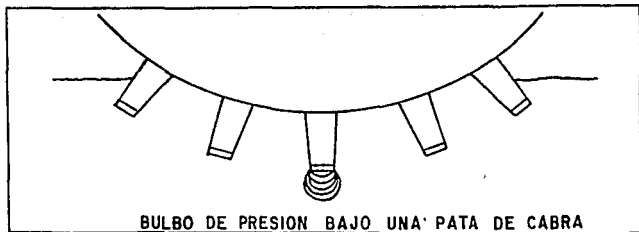
La presión de contacto de la pata compactadora determina la cantidad de compactación que se obtendrá con la máquina: esta presión de contacto debe ser la mayor posible, pero no deberá exceder la capacidad soportante del suelo que se compacta. En este caso, la máquina se hundiría en el suelo hasta que las patas adyacentes, o el propio tambor, entraran en contacto con el suelo reduciendo así la presión máxima de contacto al valor de la que pueda resistir la capacidad soportante del suelo.

El número de pasadas necesarias está en relación con el grosor de la capa, tipo de suelo, contenido de humedad y grado de compactación requerido. Cuanto mayor sea el número de pasadas y mayor sea el área de contacto de las patas del tambor, se ejercerá mayor esfuerzo compactador. También aumentando el número de pasadas para un área determinada de las patas compactadoras, se aumenta la densidad en seco producida por el apisonado y se reduce el contenido óptimo de humedad. Aumentando el área de las patas compactadoras mientras se mantiene constante la presión unitaria de contacto, se aumenta el esfuerzo compactador.

Este tipo de compactadores se ha dicho que trabajan mejor en suelos cohesivos. Sin embargo, puede producir una mayor densidad de vacíos de aire que la producida por la rueda de acero o neumática sobre el mismo material. Estos vacíos de aire aumentan la tendencia a la absorción de agua del subnivel.

A diferencia de otros equipos de compactación, la pata de cabra, compacta desde el fondo de la capa hacia arriba. Por esto, que las patas tengan una longitud igual, por lo menos al grosor de la capa que se compacta. Las longitudes normales de las patas se encuentran comprendidas entre las 7, 8 y 9 pulgadas, adaptándose a los requerimientos de diversos estados para este tipo de máquinas.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS



COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

4.- COMPACTADORES DEL TIPO REJILLA.

También llamados de red, son unidades de uso múltiple que se emplean para la compactación de rellenos, para el proceso de superficies bituminosas, viejas y aplastamiento de bancos rocosos nativos o ciertos tipos de materiales con dimensiones por encima de lo habitual.

Estas unidades, cuando están lastradas al máximo, producen presiones de más de 53.15 Kg por centímetro de ancho del tambor.

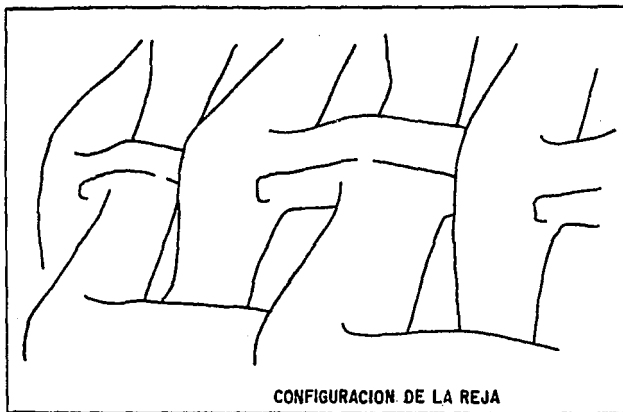
Otro tipo de apisonadora cuyo empleo va en incremento, es la máquina autopropulsada con rodillos segmentados, este diseño produce una presión de compresión interrumpida, que dirige hacia abajo el esfuerzo de compactación.

Además de estas clases y tipos de apisonadores, hay máquinas especiales que realizar el trabajo de compactación en lugares en que los equipos normales no trabajarían con eficiencia y economía. Una de estas es la apisonadora de zanjas para el ensanche de pavimentos, superperaltación de curvas y otros trabajos de nueva construcción. El rodillo de compresión puede ajustarse verticalmente para trabajar a cualquier profundidad hasta las 25 pulgadas. El esfuerzo de compactación varía de 300 a 375 libras/pulgada lineal de anchura del rodillo.

Para la compactación en las inmediaciones de pilares de puentes, paredes y otras áreas que resultar inaccesibles para el equipo estándar, se emplean pisonos vibratorios manuales. Estos pisonos trabajan sobre materiales granulares y asfálticos, produciendo hasta 750 yardas cuadradas de compactación por hora. La energía vibratoria es suministrada por motores de gasolina o por aire comprimido.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

Otras innovaciones, tales como la pulverización, mezclado, envuelta y estabilización, están contribuyendo a dar mayor longevidad y durabilidad a las carreteras de hoy.



COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

4.- RODILLO DE IMPACTO.

A causa de los problemas de limpieza del rodillo de reja, se diseñó un nuevo rodillo usando los mismos principios: El Rodillo de Impacto. Es un rodillo metálico, en el que se han fijado unas salientes en forma aproximada de una pirámide rectangular truncada.

Estas pirámides no son de la misma altura pues hay unas más altas que otras siguiendo el modelo de puntas altas y bajas del rodillo de reja, esto dá las mismas ventajas, pudiéndose limpiar fácilmente por medio de dientes sujetos al marco.

Estas salientes han sido diseñadas de tal manera que el área de contacto se incrementa con la penetración, ajustándose automáticamente la presión a la resistencia del suelo compactado.

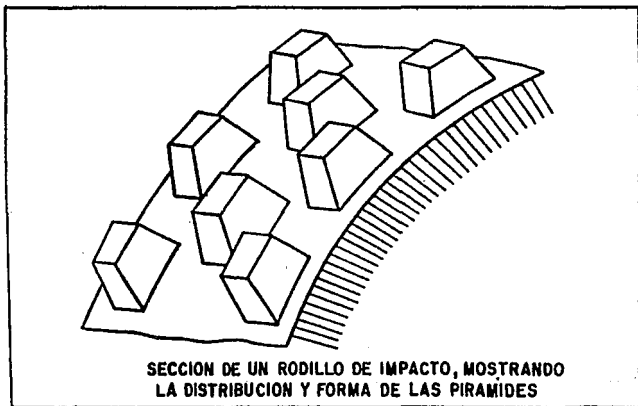
El diseño contempla también una fácil entrada y salida a la capa, lo que disminuye la resistencia al rodamiento.

Estos rodillos han probado ser muy eficientes y eliminan estratificación en los terraplenes, esto es importante en corazones impermeables de presas.

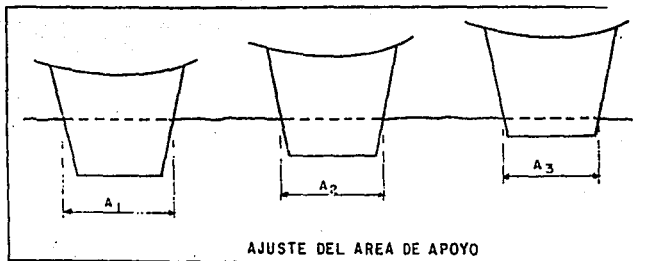
Cuando un rodillo de impacto empieza una nueva capa, que no sea mayor de 30 cm. los bulbos de presión y las ondas de impacto proveen suficiente amasamiento con la capa inferior para eliminar la estratificación que ocurre con cualquier otro compactador excepto la pata de cabra.

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.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS



COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS



AJUSTE DEL AREA DE APOYO

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

5.- RODILLOS VIBRATORIOS.

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 casi limitada a suelos granulares.

La vibración provoca un reacondo de las partículas del suelo que resulta en un incremento del peso volumétrico, pudiendo alcanzar espesores grandes de la capa (0.80 m).

Estos rodillos pueden producir un gran trabajo de compactación en relación a su peso estático, ya que la principal fuente de trabajo es la fuerza dinámica de compactación.

Buscando extender ventajas a suelos cohesivos se han desarrollado rodillos para de zapra vibratorios, en los que la fuerza y la amplitud de la vibración se han aumentado, y se ha disminuido la frecuencia, con el mismo objeto se han acoplado dos rodillos vibratorios, "fuera de fase", a un marco rígido para obtener efecto de amasamiento.

Estos rodillos se clasifican por su tamaño, pequeños hasta 9 000 Kg de fuerza dinámica y grandes de más de 9000, pudiendo llegar hasta 20,000 Kg o más. Los grandes pueden llegar a sobreesforzar suelos débiles por lo que hay que manejarlos con cuidado.

Todos los vibradores deben manejarse velocidades de 2.5 a 5 Km/hora. Velocidades mayores no incrementan la producción.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

SELECCION DE COMPACTADORES.

La elección del compactador más adecuado no siempre es sencilla, ya que depende de muchos factores: tipo de suelo, tipo de trabajo, método de movimientos de tierras, compatibilidad de trabajo, etc. en la selección final deben hacerse intervenir, cuando menos, los factores mencionados. Es frecuente y muy eficiente el uso de varios equipos que combinen los diferentes efectos de compactación.

Los factores más importantes que deben tomarse en cuenta para esta selección son:

1. Tipo de material.
2. Tamaño de la obra.
3. Requerimientos especiales.

1. Tipo de material.

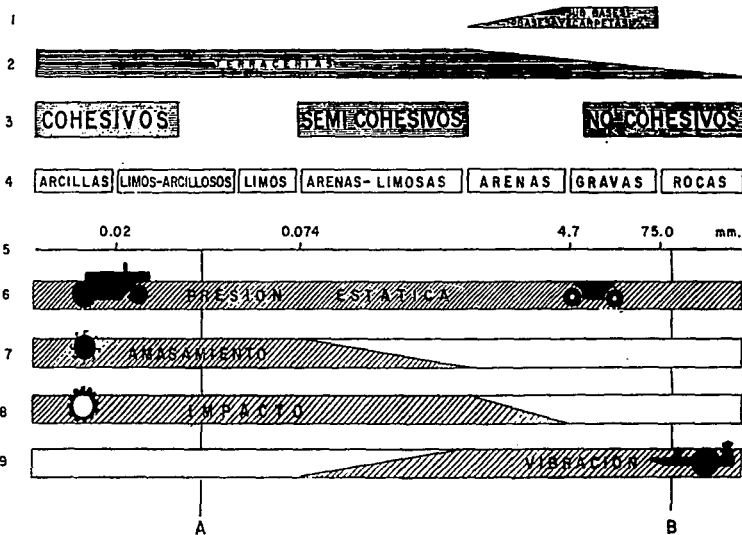
En la gráfica de selección de equipo (página siguiente), se muestra en los renglones 4 y 5, los diferentes materiales y su respectivo tamaño en milímetros. En el renglón 3, se clasifican en cohesivos, semicohesivos y no cohesivos, (los más finos son cohesivos y los granulares no cohesivos) en los renglones 1 y 2 se indica su uso más frecuente:

a. Sub-bases, bases y carpetas: siempre formadas con materiales no cohesivos (arenas y gravas).

b. Terracerias: normalmente materiales cohesivos y semicohesivos y en ocasiones no cohesivos.

SELECCION DE EQUIPO

1
2
3
4
5
6
7
8
9



COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

En el renglón 6: la compactación por presión estática (rodillos metálicos y neumáticos) es aplicable a todos los suelos. Limitación: bajo rendimiento, excepto en los compactadores neumáticos grandes.

En el renglón 7: la compactación por amasamiento (rodillo pata de cabra estática y pata de cabra vibratoria) es útil para suelos cohesivos y semicohesivos (arcillas, limos y algo en arenas limosas). Limitación: alto costo de la pata de cabra estática.

En el renglón 8: la compactación por impacto (rodillo de impacto y rodillo de reja) aplicable a toda clase de suelos, pero el mal acabado que da a la capa sólo permite aplicarlos en terracerías, normalmente arcillas y limos, a veces arenas. Limitación: el rodillo de reja se atasca con los materiales cohesivos y hay que parar frecuentemente a limpiarlo, sin embargo es un excelente disgregador, por lo que el rodillo de reja es extraordinario en terracerías que necesitan disgregado.

En el renglón 9: la compactación por vibración (rodillo liso vibratorio) es aplicable en suelos no cohesivos (arenas y gravas) y a veces algunos semicohesivos (arenas limosas).

De lo anterior se puede resumir lo siguiente:

- a. Para suelos cohesivos se debe preferir pata vibratoria o rodillo de impacto.
- b. Para suelos no cohesivos se debe preferir rodillo liso vibratorio.
- c. Para todos los suelos, rodillo neumático.
- d. Las mejores combinaciones son:

Para suelos cohesivos: neumático y pata de cabra o neumático y rodillo de impacto.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

Para suelos no cohesivos: neumático grande y rodillo vibratorio.

2. Tamaño de la obra.

Dependiendo del tamaño de la obra y habiendo ya seleccionado el tipo de compactador adecuado se puede determinar la cantidad de unidades necesarias para cumplir con el plazo estipulado.

3. Requerimientos especiales.

Existen casos en que por requerimientos especiales, es necesario decidirse por un determinado tipo de compactador, como cuando las especificaciones solicitan un compactador que no estratifique el terraplén (corazones arcillosos), esto nos haría seleccionar una pata de cabra vibratoria o un rodillo de impacto.

Debemos tener en mente que, en construcción pesada la inversión en equipo es cuantiosa y que éste se adquiere usualmente fuera del país, por lo que es muy importante pensar cuidadosamente todas las posibilidades para poder escoger una máquina más eficiente; esto es, la menor inversión posible al más bajo costo unitario en el mínimo tiempo relizable.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

CAPITULO 6.

RENDIMIENTOS Y COSTOS EN LA COMPACTACION.

1. Rendimiento de un equipo de compactación.

Para determinar la producción horaria de un equipo de compactación, se deben tomar en cuenta los siguientes factores:

- a. Ancho compactado por la máquina = A
- b. Velocidad de operación = V
- c. Espesor de la capa = E
- d. Número de pasadas para obtener la compactación especificada = N

Para calcular la producción se determina primero el área cubierta en una hora con una pasada; dividiendo la cifra así obtenida entre el número de pasadas requeridas para obtener la compactación estipulada, resulta el área compactada de suelo por hora. Multiplicando esta área por el espesor compactado de capa, se obtiene el volumen compactado por hora.

De manera que la fórmula puede escribirse como sigue:

$$P = \frac{A \times V \times E \times 10 \times C}{N}$$

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

En donde:

P = Producción horaria en metros cúbicos/hora.

A = Ancho compactado por la máquina en metros

V = Velocidad en kilómetros/Hora.

E = Espesor de capa en centímetros.

N = Número de pasadas.

10= Factor de conversión.

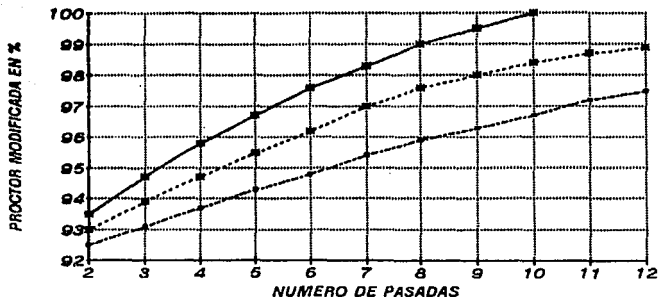
C = Eficiencia (0.6 - 0.8).

La eficiencia (C) afecta la capacidad teórica, reduciéndola por traslapes de pasadas paralelas por tiempo perdido para dar vuelta y otros factores.

Conociendo los factores anteriores para cada equipo compactador, se pueden graficar, para espesor constante, las capacidades de producción como se indica en la siguiente gráfica:

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

RELACION GRADO DE COMPACTACION Y NUMERO DE PASADAS



Equipo liso vibratorio:

V1 = Velocidad del equipo 1.5 km/h

V2 = Velocidad del equipo 3.0 km/h

V3 = Velocidad del equipo 6.0 km/h

A continuación se presentan algunos casos típicos de utilización de equipos para diferentes profundidades de capa y sus correspondientes número de pasadas para 90 % y 95 %:

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

EJEMPLOS TIPICOS

Equipo	Profundidad de la capa en cm.	Nº de pasadas	
		para 90%	para 95%
Rodillo metálico	10 a 20	7 a 9	10 a 12
Neumático ligero	15 a 20	5 a 6	8 a 9
Neumático pesado	hasta 70	4 a 5	6 a 8
Rodillo de impacto	20 a 30	5 a 6	6 a 8
Rodillo de reja	20 a 25	6 a 7	7 a 9
Pata de cabra vibratoria	20 a 30	3 a 5	6 a 7
Liso vibratorio	20 a 30	ver gráfica anterior	

2. Costo de la compactación.

Conociendo la capacidad de producción de un compactador y para conocer el costo del metro cúbico compactado, es necesario determinar el costo horario del equipo.

Para la determinación del costo horario del equipo de compactación, se llevan a cabo los mismos pasos que se siguen para la determinación de cualquier otro costo horario de equipo de construcción, es decir, se deben obtener:

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

a. Cargos fijos.

- Depreciación
- Intereses
- Seguros
- Almacenaje
- Mantenimiento.

b. Consumos

- Combustibles
- Lubricantes
- Llantas

c. Operación

d. Transporte

Para determinar los incisos anteriores, es necesario contar con los siguientes datos generales:

- Precio de adquisición
- Equipo adicional
- Valor inicial (V_a)
- Valor de rescate (V_r)
- Tasa de interés (i)
- Prima de seguros (S)
- Vida económica (V_e)
- Horas por año (H_a)

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

- Factor de operación
- Coeficiente de almacenaje (K)
- Factor de mantenimiento (Q)
- Motor de gasolina o diesel
- Potencia (HP)
- Factor de operación
- Potencia de operación (PC)

Y de acuerdo con dichos datos, se puede establecer la siguiente rutina de cálculo:

I. Cargos fijos.

a. Depreciación:

$$I = \frac{V_a - V_r}{V_e}$$

b. Inversión:

$$S = \frac{V_a + V_r}{2 \text{ Ha}} \quad i$$

c. Seguros:

$$S = \frac{V_a + V_r}{2 \text{ Ha}} \quad s$$

d. Almacenaje

$$A = KD$$

e. Mantenimiento

$$M = QD$$

Suma de cargos fijos por hora = D+I+S+A+M

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

II. Consumos

- a) Combustibles: $E = ePc$
para gasolina: $e=0.20$
para diesel: $e=0.24$
- b) Otras fuentes de energia Of
- c) Lubricantes: $L = aPe$
Capacidad Carter: c (litros)
Cambios aceite: t (horas)
De donde:

$$a = \frac{c \cdot 0.0035}{t \cdot 0.0030} \times Pc$$

Y: Pe = precio del lubricante

- d) Llantas:

V_{11} = valor de las llantas

H_v = vida económica de las llantas

$$L1 = \frac{V_{11}}{H_v}$$

Suma consumos por hora = $E + O_f + L + L1$

III. Operación

Salario base del operador

Salario real del operador

Salario/turno prom. = (S)

Horas/turno prom. = (H)

$H = 8 \text{ horas} \times 0.83$ (factor de rendimiento)

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

$$C = \frac{S}{H}$$

Sumando

- a. Cargos fijos
- b. Consumos
- c. Operación
- d. Transporte

COSTO HORARIO

Determinando el costo horario del equipo y conociendo la producción del mismo, para un cierto grado de compactación, se puede obtener el costo por metro cúbico compactado.

$$\text{Costo por metro cúbico} = \frac{\text{costo horario por equipo}}{\text{Producción Horaria Equipo}}$$

A continuación analizaremos a manera de ejemplo y basándonos en lo anteriormente expuesto los tres siguientes casos.

Si suponemos que tenemos un material por compactar compuesto por 30% de limo y 70% de arena, consideramos que se trata de un material granular y por lo tanto, un compactador vibratorio es el indicado.

Examinaremos las siguientes alternativas:

1. Rodillo vibratorio liso arrastrado por tractor agrícola.
2. Rodillo sencillo vibratorio liso autopropulsado.
3. Rodillo doble (tandem) vibratorio autopropulsado.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

I. Determinación de los costos horarios.

1. Rodillo vibratorio liso arrastrado por tractor agrícola.
- | | |
|-----------------------------------|------------------|
| Precio de adquisición del rodillo | \$55'000,000.00* |
| Precio de adquisición del tractor | \$42'000,000.00 |

* Nota.- Los costos varían constantemente y sólo se asentarán aquí como un ejemplo. En cada caso real, es necesario actualizarlos.

Consideramos una vida útil del conjunto de 8,000 horas y un valor de rescate de cero.

Cargos fijos	\$31,040.00
Consumos	\$ 1,795.00
Operación	\$ 3,599.00
Transporte	\$ 900.00
	\$37,334.00
	por hora.

2. Rodillo sencillo vibratorio autopropulsado.
- | | |
|-----------------------|------------------|
| Precio de adquisición | \$120'000,000.00 |
|-----------------------|------------------|

En este caso también se considera una vida útil de 8,000 horas y un valor de rescate de cero.

Cargos fijos	\$33,600.00
Consumos	\$ 1,800.00
Operación	\$ 3,600.00
Transporte	\$ 900.00
	\$39,900.00
	por hora.

3. Rodillo Tándem vibratorio autopropulsado
- | | |
|-----------------------|------------------|
| Precio de adquisición | \$215'000,000.00 |
|-----------------------|------------------|

Y haciendo la misma consideración con respecto a la vida útil y al valor del rescate que en las alternativas anteriores.

Cargos fijos	\$57,491.00
Consumos	\$ 2,580.00
Operación	\$ 3,590.00
Transporte	\$ 900.00
	\$64,561.00
	por hora

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

II. Determinación de Producciones horarias.

1. Rodillo arrastrado por tractor agrícola.

Ancho = 1.50 m
Velocidad = 4 Km/ hora
Espesor = 20 cm
Número de pasadas = 4 para 95%
Coeficiente de reducción = 0.7
Eficiencia = 0.75

De acuerdo con la fórmula siguiente se tiene:

$$P = \frac{A \times V \times E \times 10 \times L}{N}$$

$$P = \frac{(1.50) (4) (20) (10) (0.7) (0.75)}{4}$$

$$P = 157 \text{ metros cúbicos/hora.}$$

2. Rodillo autopropulsado

Ancho	= 2.14 m
Velocidad	= 4 Km/hora
Espesor	= 20 cm
Número de pasadas	= 4 para 95%
Coeficiente de reducción	= 0.8

Ya que este equipo es mayor de maniobrabilidad y de mayor energía dinámica, se considera $c = 0.8$

$$P = \frac{(2.14) (4) (20) (10) (0.7) (0.75)}{4} = 224.7 \text{ metros cúbicos por hora}$$

$$P = 224.7 \text{ metros cúbicos por hora.}$$

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

3. Rodillo Tandem autopropulsado.

Ancho	= 1.50 m
Velocidad	= 4 km/hora
Espesor	= 20 cm
número de pasadas	= 2 por ser dos rodillos
Coefficiente de reducción	= 0.8
Eficiencia	= 0.75

$$P = \frac{(1.50)(4)(20)(10)(0.8)(0.75)}{2} = 360$$

P = 360 metros cúbicos/ hora

III. Determinación del costo de compactación.

	costo horario	producción m3/h	costo por metro cúbico	
Caso 1	\$37,334.00	157	238	/m3
Caso 2	\$39,900.00	224.7	178	/m3
Caso 3	\$64,561.00	360	179	/m3

Se hace notar que a pesar de que la diferencia de valor de adquisición entre los casos (1) y (3) es de 222% aproximadamente, se obtiene un ahorro en el caso (3), del costo de compactación, cercana al 32%

Suponiendo que se contara con un compactador de impacto autopropulsado, con un costo horario de \$ 67,500.00 y se tratara de compactar el material granular del ejemplo, se obtiene:

Producción horaria:

Ancho = 1.94 m.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

Velocidad	= 9 km/hora
Espesor	= 20 cm. (suelos)
Número de pasadas (sus cuatro rodillos)	= 8 pasadas (contando sus cuatro rodillos)
Coefficiente de reducción	= 0.7
PRODUCCION	= $\frac{1.94 \times 9 \times 20 \times 10 \times 0.7}{8} \times 0.8$
PRODUCCION	= 244 m ² /h
COSTO POR COMPACTACION	= $\frac{\$ 67,500.00/h}{244 \text{ m}^2/h}$
COSTO POR COMPACTACION	= \$ 277.00

El costo obtenido demuestra una mala selección del equipo, ya que resultó mayor que los obtenidos para rodillos vibratorios

El caso contrario puede encontrarse cuando con un rodillo vibratorio liso se traten de compactar materiales altamente cohesivos para los cuales el compactador de impacto resultará más ventajoso.

Ahora analizaremos el siguiente caso:

Material por compactar: Arena bien graduada
 Volumen por compactar: 300 m³ compactos/hora
 Compactación al 95 %
 Eficiencia 70 %

A. PLANCHA TANDEM

Ancho de los Rodillos	= 1.20 m
Velocidad máxima de desplazamiento	= 2 Km/h
Número de pasadas para obtener el 95% de compactación	= 11
Espesor compacto de capa	= 12 cm
Costo horario	= \$ 25,000

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

B. RODILLO VIBRATORIO AUTOPROPULSADO

Ancho del rodillo	= 1.50 m
Velocidad máxima de desplazamiento	= 4 Km/hora
Número de pasadas para obtener el 95% de compactación	= 4
Espesor compacto de capa	= 25 cm
Costo horario	= \$ 50.000

PREGUNTAS

- 1.- ¿ Cuántas Planchas Tandem son necesarias para compactar 300 m³ sueltos por hora?
- 2.- ¿ Cuántos Rodillos Vibratorios son necesarios para compactar 300 m³ sueltos por hora?
- 3.- ¿ Qué equipo proporcionará una compactación más económica?

En primer lugar se determinarán las producciones horarias de los equipos.

A) PLANCHA TANDEM

$$P = \frac{1.20 \times 2 \times 12 \times 10}{11} \times 0.70$$

$$P = 18.3 \text{ m}^3/\text{h (compactos)}$$

B) RODILLO VIBRATORIO

$$P = \frac{1.50 \times 4 \times 25 \times 10}{4} \times 0.70$$

$$P = 262 \text{ m}^3/\text{h (compactos)}$$

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

R E S P U E S T A S

1.- Se necesitan tantas Planchas como:

$$\frac{300 \text{ m}^2/\text{h}}{18.3 \text{ m}^2/\text{h}} = 16.39 = 17 \text{ planchas}$$

Se pueden utilizar 16 unidades, pero con utilización optima que frecuentemente resulta difícil de obtener. Se necesitan usar 17 unidades, lo cual resulta totalmente impractico.

2.- Los rodillos vibratorios necesarios son:

$$\frac{300 \text{ m}^2/\text{h}}{262 \text{ m}^2/\text{h}} = 1.14 = 2 \text{ rodillos}$$

3.- Determinación del costo de compactación:

A) Planchas Tandem (6 - 8 tons.)

$$\text{Costo} = \frac{\text{Costo Horario}}{\text{Producción}}$$

$$\text{Costo} = \frac{\$ 25,000.00/\text{h}}{18.3 \text{ m}^2/\text{h}} = \$ 1,366.12/\text{m}^2$$

Costo que resulta ser muy elevado.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

B) Rodillos Vibratorios

$$\text{Costo} = \frac{\$ 50,000.00/\text{h}}{262 \text{ m}^2/\text{h}} = \$ 190.83/\text{m}^2$$

Que es un costo razonable.

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

CAPITULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La mejor manera de mejorar los elementos mecánicos en un suelo, es por medio de la compactación, ya que este proceso, bien ejecutado produce efectos importantes como son: aumento de la resistencia mecánica, minimización de asentamientos y reducción de la permeabilidad. Cabe aclarar que en toda vía terrestre deben existir obras de drenaje eficientes que eviten la erosión la erosión de los terraplenes que puede ser causante de asentamientos graves, aún habiendo una buena compactación.

Para lograr que dicha compactación sea la óptima es de suma importancia que el contenido de humedad sea el adecuado, es decir, que el material contenga la humedad necesaria para que bajo una cierta energía de compactación se consiga una densificación óptima.

Los esfuerzos de compactación pueden ser transmitidos al suelo mediante el uso o la combinación de algunos de los siguientes efectos: presión estática, impacto, vibración y amasamiento.

Para lograr cualesquiera de los efectos antes mencionados existen diferentes equipos de características particulares. La selección y uso de algún tipo de compactado o la combinación de algunos otros, dependerá básicamente del tipo de suelo que se quiera compactar.

Los suelos para efecto de simplicidad se pueden dividir en: Suelos compactables y suelos no compactables; Los no compactables son aquellos en los que después de disgregado el material, tienen más del 20% de retenido en la malla de 7.5 cm. (3"). Y más del 5% de retenido en la malla de 15

COMPACTACION Y EQUIPO EN TERRACERIAS

cm. (6"). los materiales compactables que como máximo tienen un 20% y un 5% de material retenido en las mallas de 3" y 6" respectivamente.

La elección de los compactadores deberá llevarse al cabo con el debido cuidado y tratando de hacer intervenir las variables implicadas ya que de esto dependerá el éxito económico y funcional de la compactación.

Para que la compactación se lleve al cabo correctamente será necesario establecer un serio control de calidad. De manera que para poder controlar la compactación se tendrán que efectuar las pruebas necesarias o las que se especifiquen en el proyecto correspondiente. Es evidente que dichas pruebas deberán ser reportadas oportunamente para evitar que, en su caso, las correcciones procedentes afecten las subsiguientes actividades provocando que se generen costos adicionales que en muchos casos suelen ser importantes.

En todos los casos es importante que en, la medida de lo posible, se ejecuten los trabajos de compactación apegándose a las especificaciones de proyecto o de la dependencia encargada de elaborarlas.

El costo de compactación representa una muy pequeña parte del costo total de la obra en la mayoría de los casos. A cambio de esto, la compactación tiene una decisiva influencia en la calidad y vida útil de la obra civil.

Una buena compactación incrementa de manera sustancial, el valor de soporte y la estabilidad del material, mejora la impermeabilidad en la mayoría de los casos y prácticamente elimina los asentamientos o en su defecto los minimiza. Así pues, la compactación hace al suelo capaz de soportar las cargas para las que se proyecte la obra en cuestión y reduce de manera importante los costos de mantenimiento.

BIBLIOGRAFIA

- MECANICA DE SUELOS. Tomo I
Juárez Badillo E. - Rico Rodriguez Alfonso.
Editorial LIMUSA, 1986.
- MECANICA DE SUELOS, Tomo II
Juárez Badillo E. - Rico Rodriguez Alfonso.
Editorial LIMUSA, 1986.
- MANUAL DE TECNICAS DE COMPACTACION, División de
Máquinas de Carreteras de la Bros Incorporated, 1973.
- CONTROL TOTAL DE LA CALIDAD.
Feingenbrum A. V.
Editorial CONTINENTAL 1985.
- CONTROL DE CALIDAD ESTADISTICO.
Grant Eugene L..
Editorial CONTINENTAL 1973.
- ESTANDARIZACION DE PRUEBAS DE COMPACTACION ESTATICA
PARA CONTROL Y ESTUDIO DE VARIABILIDAD DE ESTAS PRUEBAS
EN COMPARACION CON LAS DINAMICAS.
Tesis Profesional (Director F. Olivera B.)
ENEP, Aragón, UNAM, 1985.
- ESTRUCTURACION DE VIAS TERRESTRES
Olivera Bustamante Fernando.
Editorial CONTINENTAL 1988.
- CAPA SUBRASANTE, SEMINARIO DE TERRACERIAS
Moreno Torres y Olivera Bustamante.
SAHOP, 1978.
- DESIGN AND CONSTRUCTION OF ROLLED EARTH DAMS
Proctor R. R.
Editorial E.N.R. 1933.
- MANUAL DE COSTOS Y PRECIOS EN LA CONSTRUCCION 1987.
Suárez Salazar Carlos.
Editorial LIMUSA, 1989.
- COSTO Y TIEMPO EN EDIFICACION
Suárez Salazar Carlos.
Editorial LIMUSA, 1988.