

24.52

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

COMPACTACION DE SUELOS
GRANULARES

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

Ingeniero Civil

PRESENTA:

Sigifredo Andres Figueroa Rea

México, D. F.

1981



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

COMPACTACION DE SUELOS GRANULARES

- CAPITULO 1 INTRODUCCION
- CAPITULO 2 SUELOS GRANULARES Y MUESTREO
 - 2.1. CLASIFICACION DE SUELOS
 - 2.2. CLASIFICACION DE SUELOS GRANULARES
 - 2.3. LUGARES DONDE SE ENCUENTRAN
 - 2.4. MUESTREO EN SUELOS
- CAPITULO 3 CARACTERISTICAS Y PROPIEDADES DE LOS SUELOS GRANULARES
 - 3.1. CARACTERISTICAS DE LOS SUELOS GRANULARES
 - 3.2. PROPIEDADES DE LOS SUELOS GRANULARES
 - 3.2.1. PRUEBAS DE LABORATORIO PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES ESFUERZO-DEFORMACION DE LOS SUELOS GRANULARES
 - 3.2.2. CARACTERISTICAS ESFUERZO-DEFORMACION DE LOS SUELOS GRANULARES
 - 3.2.3. RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE DE LOS SUELOS GRANULARES
- CAPITULO 4 COMPACTACION DE SUELOS
 - 4.1. INTRODUCCION
 - 4.2. PROCESOS DE COMPACTACION DE CAMPO
 - 4.3. PRUEBAS DE COMPACTACION EN LABORATORIO
 - 4.4. COMPACTACION DE SUELOS GRANULARES
- CAPITULO 5 CONCLUSIONES

CAPITULO PRIMERO

INTRODUCCION

El estudio de la compactación de suelos es una labor difícil y delicada, porque el problema no es bien conocido, debido a los diferentes -- comportamientos que tienen los suelos y a su naturaleza.

El problema de la compactación es de gran interés en ingeniería, ya -- que se compactan carreteras, terraplenes, plataformas, bases, cimentaciones, etc. tratando de mejorar las condiciones del suelo que va a servir a una obra determinada.

La compactación de los suelos es el proceso mecánico por el cual se -- trata de mejorar ciertas características de comportamiento mecánico -- del suelo y que presente una cierta resistencia a los efectos mecánicos naturales que actuaran sobre él a través de la vida útil de la -- obra. En el proceso de compactación se mejora la resistencia al corte, la comprensibilidad y la relación esfuerzo-deformación de los suelos.

Con la compactación del suelo, se trata de evitar los asentamientos y deformaciones de cualquier naturaleza y mejorar las características de estabilidad, esto se logra con la densificación del material.

La disminución de la porosidad y de la relación de vacíos que se logra con la compactación del suelo, disminuye la permeabilidad y en algunos suelos se logra que prácticamente sean impermeables. En gravas bien -- graduadas se puede disminuir bastante la permeabilidad bajo la acción de la compactación.

La compactación también mejora la resistencia del suelo a la abrasión y los hace menos susceptibles a los movimientos internos de las partículas, y se logra que los granos no se separen tan fácilmente.

Estas características se logran en las capas de suelo al aplicarles cargas pesadas con o sin vibración por medio de equipos que se desplazan en su superficie. Los espesores de las capas por compactar son variados y dependen de las características del suelo y del equipo de compactación que se va a emplear.

Para determinar el equipo de compactación que se va a emplear en un momento determinado se debe de conocer la naturaleza del suelo, las propiedades y características de los mismos.

En el capítulo dos, trata de la clasificación de los suelos y en una forma más extensa a los suelos granulares que son el objeto del estudio. También se expone el muestreo en suelos y el lugar donde se pueden encontrar a los suelos granulares.

En el capítulo tres, se tratan las características y propiedades de los suelos granulares, definiendo pruebas de laboratorio que determinan las relaciones esfuerzo-deformación, la resistencia al esfuerzo cortante y las características de comportamiento de estos suelos.

En el capítulo cuatro trata la compactación de los suelos, así como de los procesos y equipos de compactación de campo y, de las pruebas de laboratorio sobre compactación de suelos.

En este capítulo se trata además, la compactación de suelos granula-

res, del equipo que se debe de emplear en estos suelos y las dificultades que se presentan para compactar dichos suelos en el campo.

En el capítulo quinto se trata de las conclusiones sobre el contenido de la obra.

CAPITULO SEGUNDO

SUELOS GRANULARES Y MUESTREO

2.1. Clasificación de suelos

Para estudiar los suelos, se hace una clasificación de los mismos de acuerdo a sus características de comportamiento y la forma en que están constituidos. Por lo que los grupos que se forman presentan características afines. La clasificación de los suelos se hace en el laboratorio de mecánica de suelos y, de acuerdo a la experiencia se puede hacer una clasificación de los mismos en el campo en forma preliminar.

La clasificación de los suelos permite resolver algunos problemas sencillos que se presenten en la práctica, y sirve de guía para preparar programas de experimentación, si los problemas por resolver son complejos ó las obras a realizar son de gran importancia (como presas de tierra, pedraplenes y taludes de gran altura).

En la actualidad se tienen varias formas de clasificación de suelos, la mayoría utiliza pruebas muy sencillas de tipo indicativo para obtener las características necesarias de un suelo que permita encasillarlo dentro de un grupo de clasificación.

Si las pruebas utilizadas en una determinada clasificación de suelos, resultan más complicadas que la necesaria para medir directamente la propiedad fundamental que se desea conocer, dicha clasificación pierde su utilidad.

Las características más utilizadas para hacer una buena clasificación

de los suelos son la granulometría y la plasticidad.

A continuación se presentan las clasificaciones más conocidas

CLASIFICACION DE SUELOS BASADA EN EL TAMAÑO DE PARTICULAS (GRANULOMETRIA)

- a) Clasificación Internacional
- b) Clasificación MIT (Massachusetts Institute of Technology)
- c) Clasificación propuesta por Kopecky
- d) Clasificación de suelos usado en SOP (SAHOP)

CLASIFICACION DE SUELOS BASADA EN LA PLASTICIDAD

- a) S U C S (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos)

El SUCS, es el más usado para la clasificación de los suelos, se basa en la carta de plasticidad, que es el resultado de una investigación de laboratorio realizada por "A. CASAGRANDE".

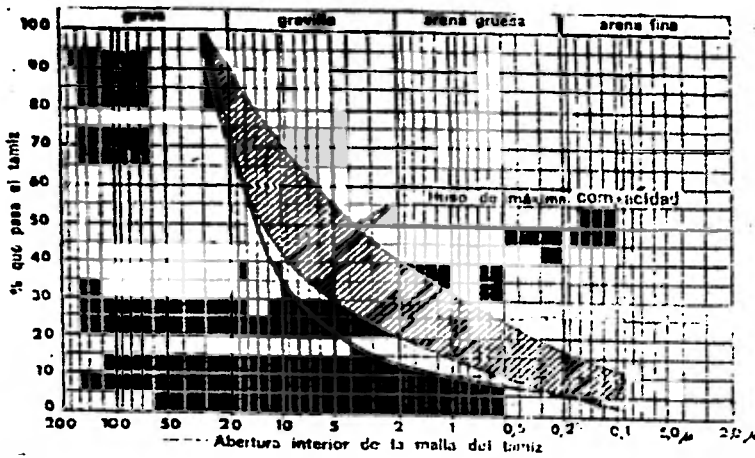
La carta de plasticidad se presenta en una gráfica de coordenadas -- cartesianas en la cual se establecen fronteras que separa a los materiales finos, en diferentes grupos de propiedades afines.

El sistema unificado de clasificación de suelos, abarca tanto a los suelos gruesos como a los finos, distinguiendo a ambos por el cribado a través de la malla N°200, donde las partículas que son retenidas en dicha malla son los suelos gruesos y las que pasan son los -- suelos finos.

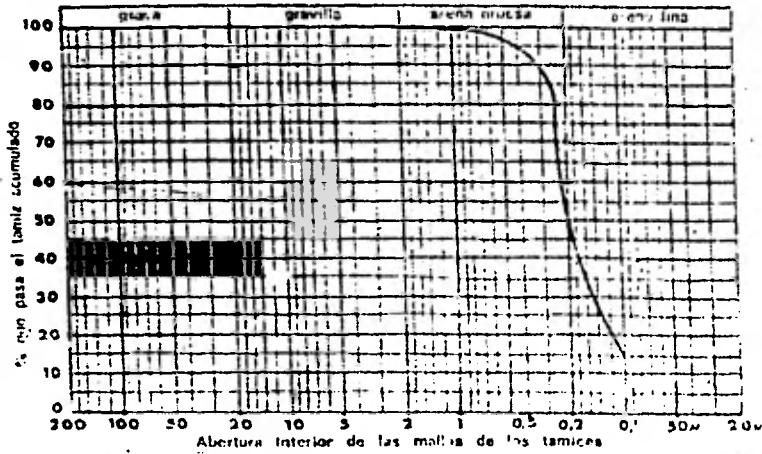
CLASIFICACION RAPIDA DE LOS SUELOS GRANULARES

PROCEDIMIENTO DE IDENTIFICACION EN OBRA		SIMBOLOS (U.S.C.S.)	DESIGNACION Geotécnica	
<p>Más de la mitad de elementos son > 0.08 mm</p> <p>SUELOS GRANULARES</p>	<p>Más de la mitad de los elementos > 0.08 mm tienen un diámetro > 2 mm</p> <p>GRAVAS</p>	sin finos	<p>Todos los diámetros de los granos están presentes sin apreciarse predominio de alguno.</p> <p style="text-align: center;">GW</p>	Grava limpia bien graduada
		sin finos	<p>Predomina una dimensión de granos o de conjunto de granos.</p> <p style="text-align: center;">GP</p>	Grava limpia mal graduada
		con finos	<p>Los elementos finos no tienen cohesión.</p> <p style="text-align: center;">GM</p>	Grava limosa
		con finos	<p>Los elementos finos tienen cohesión.</p> <p style="text-align: center;">GC</p>	Grava arcillosa
	<p>Más de la mitad de los elementos > 0.08 mm tienen un diámetro > 2 mm</p> <p>ARENAS</p>	sin finos	<p>Todos los diámetros de los granos están presentes sin apreciarse predominio de alguno.</p> <p style="text-align: center;">SW</p>	Arena limpia bien graduada
		sin finos	<p>Predomina una dimensión de grano o de conjunto de granos.</p> <p style="text-align: center;">SP</p>	Arena limpia mal graduada
		con finos	<p>Los elementos finos no tienen cohesión.</p> <p style="text-align: center;">SN</p>	Arena limosa
		con finos	<p>Los elementos finos tienen cohesión.</p> <p style="text-align: center;">SC</p>	Arena arcillosa

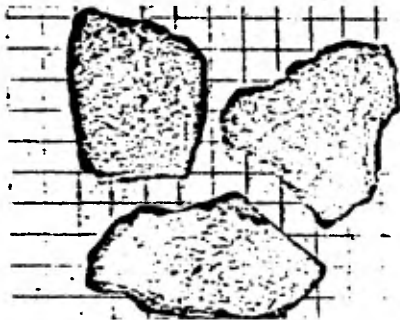
CLASIFICACION DE LABORATORIO DE LOS SUELOS GRANULARES (más del 50 % de elementos > 0,08 mm)			
GRAVAS	Más del 50 % de elementos > 0,08 mm tienen un diámetro > 2 mm Menos del 5 % de elementos < 0,08 mm	GW $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ y $1 < C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}} < 3$	Grava limpia bien graduada
		GP No cumple una de las condiciones de Gb.	Grava limpia mal graduada
		GM Límites de Atterberg por debajo de la línea "A".	Grava limosa
		GC Límites de Atterberg por encima de la línea "A".	Grava arcillosa
ARENAS	Más del 50 % de elementos > 0,08 mm tienen un diámetro < 2 mm Menos del 5 % de elementos < 0,08 mm	SW $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ y $1 < C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}} < 3$	Arena limpia bien graduada
		SP No cumple una de las condiciones de Sb.	Arena limpia mal graduada
		SM Límites de Atterberg por debajo de la línea "A".	Arena limosa
		SC Límites de Atterberg por encima de la línea "A".	Arena arcillosa
5 % < % inferior a 0,08 mm < 12 % → se utiliza un doble símbolo			



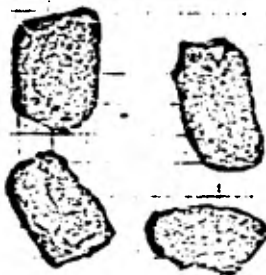
Curva de granulometría de la grava para base. Ref. 8 Cap. 4



Granulometría de la arena de Anglesqueville. Ref. 8 Cap. 4



$3\frac{1}{2}'' - 7''$



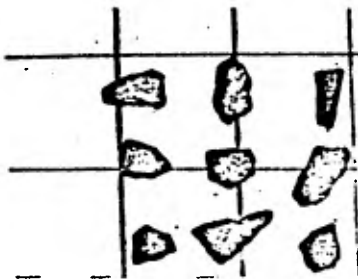
$1\frac{1}{2}'' - 3\frac{1}{2}''$



$\frac{3}{4}'' - 1\frac{1}{2}''$



$\frac{3}{8}'' - \frac{3}{4}''$



$\frac{1}{4}'' - \frac{3}{8}''$



No 4 - $\frac{1}{4}''$

Conglomerado de Malpaso Ref. 5



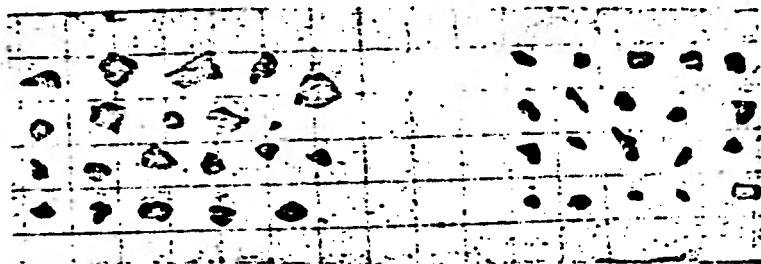
$3\frac{1}{2}'' - 7''$

$1\frac{1}{2}'' - 3\frac{1}{2}''$



$\frac{3}{4}'' - 1\frac{1}{2}''$

$\frac{3}{8}'' - \frac{3}{4}''$



$\frac{1}{4}'' - \frac{3}{8}''$

No 4 - $\frac{1}{4}''$

Basalto de San Francisco Ref. 5

2.2. CLASIFICACION DE SUELOS GRANULARES

Los suelos granulares son en general los retenidos en la malla No. 200 y de acuerdo al tamaño de las partículas se clasifican en:

- Arenas finas
- Arenas gruesas
- Gravas
- Enrocamientos

cada uno de los cuales puede tener un cierto contenido de finos.

Los suelos granulares son de gran importancia en ingeniería en diferentes etapas de la construcción de acuerdo a su tamaño, forma y características de los mismos.

Estos suelos son utilizados en la construcción de presas de materiales graduados (por ejemplo la Presa Hidroeléctrica de Chicoasen en la que se utilizó diferentes tamaños de material granular). También se colocan materiales granulares en la construcción de carreteras en la base y sub-base, en los ferrocarriles se utiliza como balasto, etc., Otros usos es en terraplenes, pedraplenes y en la elaboración de concretos.

2.3. LUGARES DONDE SE ENCUENTRAN SUELOS GRANULARES

2.3.1. Conos Deyyección

Estos depósitos se forman por el acarreo de corrientes fluviales y viento. Se encuentran generalmente en los valles, al pie de las montañas y pueden tener mucha pendiente, teniendo grandes fragmentos de roca y guijarros o ser casi planos de suave pendiente constituidos por materiales finos generalmente. En los extremos superior e inferior del cono y a los lados del mismo se encuentran elementos de mayor tamaño.

2.3.2. Depósitos en Terrazas

Estos depósitos se localizan a los lados de los arroyos o en las planicies aluviales de los ríos formando grandes bancos. Por lo general los materiales de estos depósitos son gravas y arenas redondeadas bien graduadas.

Los depósitos de aluvión se localizan en los límites de un valle fluvial y el material puede tener muchos kilómetros de ancho normal al cauce del río. En los ríos meandriformes el material suele ser delgado y en la cercanía de los arroyos se puede localizar los depósitos de las planicies de aluvión, puede ser un proceso laborioso ya que por lo general tienen material fino que se debe de eliminar por medio de lavado. (En el P.H. de Chicoasen para concreto y la elaboración del filtro (grava arena), se estrajo de material aluvión del Rio Grijalva, este material se lavó y clasificó en la Planta T-1 localizada aguas abajo de la cortina).

2.3.3. LAS DUNAS DE ARENA

Se localizan a lo largo de antiguas planicies de aluvión en el que el viento ha actuado clasificando el material, en llanuras semiáridas ó a lo largo de las playas.

Por lo general las dunas se encuentran en zonas en que la vegetación es muy escasa o falta en lo absoluto. El material de las dunas es por lo general arena mal graduada.

2.3.4. DEPOSITOS RESIDUALES

En ocasiones se obtiene arena y algunas veces gravas en los depósitos procedentes de la destrucción por meteorización de la superficie del suelo. Son típicas las que proceden de granitos, areniscas y, bajo algunas condiciones cuarcitas.

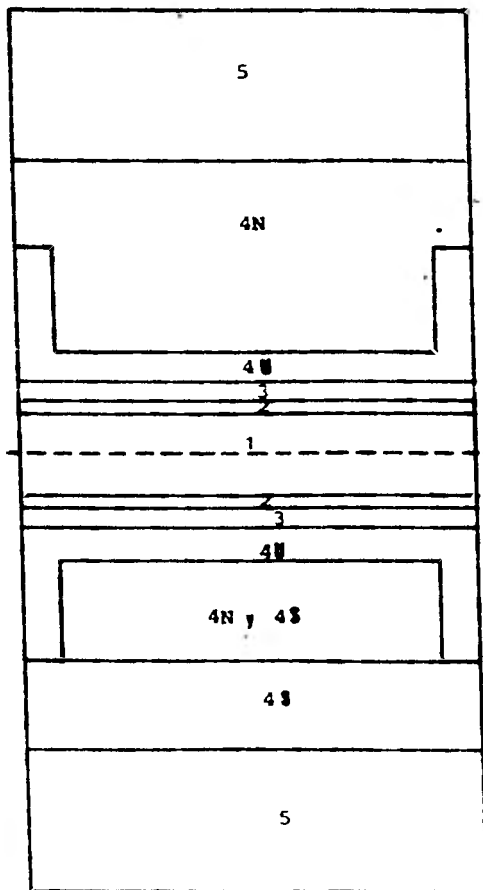
En todos los lugares en que se encuentran estos depósitos su extensión es limitada y para emplearlos en construcción es necesario hacer un análisis cuidadoso del material, para asegurarse que los materiales no estén demasiado meteorizados y se puedan utilizar.

2.3.5. OTRAS FUENTES

En los deltas formados en la desembocadura de los grandes ríos o arroyos se pueden localizar depósitos de grava y arena pero con un porcentaje elevado de limo y arcilla.

También se puede obtener material por medio de la trituración de roca de una pedrera. Los tamaños obtenidos en la trituración pueden ser -- varios.

AGUAS ARRIBA



PLANTA DE LA CORTINA DEL P.H. DE
CHICOASEN, CHIS.

1. Arcilla
2. Filtro
3. Material de ± 6" máximo

4B material de ± 12" máximo

4N Roca limpia bien graduada de
20" (50 cm) máximo

4S Roca con alto contenido de finos
de 20" (50 cm) máximo

5 Roca limpia con tamaños máximos de
4 60" (150 cm)

AGUAS ABAJO

Un ejemplo de obtención de material granular por trituración fué el obtenido en la planta T-1 del Proyecto Hidroeléctrico de Chicoasen, en la que se obtuvo por trituración de roca material menor de dos pulgadas bien graduado que se mezclaba con la arcilla (lutita), que se colocó como material impermeable en la cortina; material 3 (menor de seis pulgadas uniforme), este material se colocó en la cortina al lado del filtro que va tanto en aguas arriba como en aguas abajo; material 4U, este se colocó pegado al material 3 tanto en aguas arriba como en aguas abajo de la misma cortina. Además se obtuvo gravas para la elaboración de concretos.

2.4. MUESTREO EN SUELOS GRANULARES

Para obtener un resultado correcto de las características y propiedades de un suelo en el que se construirá una obra de ingeniería, es necesario obtener muestras del suelo para ser estudiadas en el laboratorio o en forma preliminar en el campo.

En el laboratorio de mecánica de suelos es donde se obtienen los datos del comportamiento a la deformación y resistencia que el suelo tiene al someterlo a ciertos esfuerzos para un caso particular.

Por lo que el muestreo en suelos y las pruebas del laboratorio se ligan para obtener un buen resultado que indique el comportamiento del suelo.

El muestreo de los suelos consiste en obtener muestras lo más inalterables que se puedan, para que estas presenten las propiedades reales

del suelo así como los esfuerzos a los que está sometido. Las muestras se pueden obtener de pozos a cielo abierto o extrayendo la muestra por medio de equipos especiales. Una identificación del tipo de suelo se puede hacer en forma preliminar en el terreno, esta se hace por medio de la vía visual y manual, si el material contiene partículas gruesas se extiende sobre una superficie plana y se procede a examinar su graduación, tamaño y forma de los granos y si es posible por su composición mineralógica.

Cuando no se cuenta con experiencia es difícil la determinación IN-SITU entre suelos de buena o deficiente graduación. La experiencia se obtiene comparando resultados obtenidos en el laboratorio con los que se estima en el campo.

Existen dos métodos para la obtención de muestras de suelo en el campo que son:

- a) Sondeos Exploratorios
- b) Sondeos definitivos

En la siguiente tabla (1), se dan sondeos y métodos en que se subdividen los muestreos.

TABLA 1

METODOS DE SONDEO EXPLORATORIO

- a) Pozos a cielo abierto, con muestreo alterado o inalterado
- b) Perforaciones con postesdora, barrenos helicoidales o métodos similares.
- c) Métodos de Lavado
- d) Método de penetración standard
- e) Método de penetración cónica
- f) Perforación en boleos y gravas (con barrenos, etc)

METODOS DE SONDEO DEFINITIVO

- a) Pozos a cielo abierto con muestreo inalterado
- b) Métodos con tubo de pared delgada
- c) Métodos rotatorios para roca

CAPITULO TERCERO

3.1. CARACTERISTICAS DE LOS SUELOS GRANULARES.

El comportamiento mecánico de los suelos granulares como ya se dijo - depende fundamentalmente de la forma de los granos.

La forma más común que presentan los suelos granulares es equidimensional en la que las tres dimensiones de la partícula son comparables en magnitud. Esta forma la adquieren los granos al estar en contacto con los elementos naturales como lo es el agua y el aire. La intensidad con que actúan estos agentes sobre el material, hacen que se tengan varias formas en las partículas del suelo, que son la redondeada, angulosa, subredondeada y subangulosa.

La forma redondeada es frecuente en las arenas de los ríos y en algunas playas, en las arenas eólicas que son de grano fino redondeado.

La forma angulosa es típica de las formaciones de arenas residuales y arenas volcánicas, en las arenas marinas y las arenas obtenidas de la trituración de piedra son por lo general de forma angulosa.

Las formaciones subangulosa y subredondeada son el efecto del rodado en ríos y arroyos, por la abrasión mecánica (fricción entre partículas, ó el oleaje).

3.1.1. ESTRUCTURA DE LOS SUELOS GRANULARES

La estructura más común de los suelos granulares es, la estructura simple. Las fuerzas que intervienen para formar esta estructura son bien conocidas y sus efectos son relativamente simples de calificar.

El comportamiento mecánico e hidráulico de un suelo de estructura simple, se define principalmente por dos características: la compacidad del manto y la orientación de las partículas.

3.2. PROPIEDADES DE LOS SUELOS GRANULARES

3.2.1. a) Pruebas de Laboratorio para determinar las propiedades -- esfuerzo-deformación de suelos granulares.

Las pruebas de laboratorio que se realizan a un material granular en un proceso de excitación-respuesta, nos dá un conjunto de datos que nos define el comportamiento que tendrá el suelo bajo los efectos de la obra que se construirá en él. A estas pruebas de excitación-respuesta es lo que da la relación o relaciones "Esfuerzo-Deformación".

Las deformaciones que tiene el suelo al aplicarle algún esfuerzo, depende de su composición, de su relación de vacíos, de las acciones a que estuvo sujeto anteriormente y de la forma en que se apliquen los nuevos esfuerzos. Para problemas de ingeniería en el que sea necesario conocer en forma rápida las características Esfuerzo-Deformación el método usado es el de medir directamente en una prueba de laboratorio o de campo, las deformaciones que se producen al aplicar esfuerzos lo más similares posibles a los que actuarán en la porción de suelo -- afectado por el problema real que se estudie.

Cuando es necesario la creación de una obra importante como la construcción de presas, edificios de varios niveles, etc. Se requiere un

conocimiento preciso de las relaciones Esfuerzo-Deformación, y para esto se hacen diferentes pruebas de laboratorio, cada una de las — cuales es apropiada para estudiar el comportamiento Esfuerzo-Deformación bajo un cierto tipo de cargas específico.

La prueba triaxial es la más importante en el laboratorio para determinar las características Esfuerzo-Deformación de los suelos en estudio.

La prueba triaxial consiste en tener una muestra cilíndrica de suelo, que se somete primero a una presión de confinamiento (σ_c) en todas sus caras. A continuación se incrementa el esfuerzo axial (σ_1) hasta hacer fallar a la muestra. Como no existen fuerzas tangenciales sobre las caras de las muestras el esfuerzo axial ($\sigma_1 + \Delta \sigma_1$) y la presión de confinamiento σ_c son los esfuerzos principales mayor y menor respectivamente.

La muestra de suelo para prueba triaxial, se prepara en un molde de 4 cm. de diámetro y de 8 a 10 cm. de altura, en materiales que no se pueden preparar moldes de estas medidas, se preparan muestras mayores de unos 8 cm. de diámetro y de 15 a 20 cm. de longitud. Para muestras de suelo que contienen gravas se emplean muestras mucho mayores por problemas en la preparación de la muestra para realizar la prueba.

La prueba triaxial se realiza de varias formas y de las más conocidas son las siguientes:

PRUEBA TRIAXIAL DE CARGA CONTROLADA

PRUEBA TRIAXIAL DE DEFORMACION CONTROLADA

PRUEBA TRIAXIAL DE EXTENSION

Existen otras pruebas además de estas, pero las tres anteriores son de las más usadas.

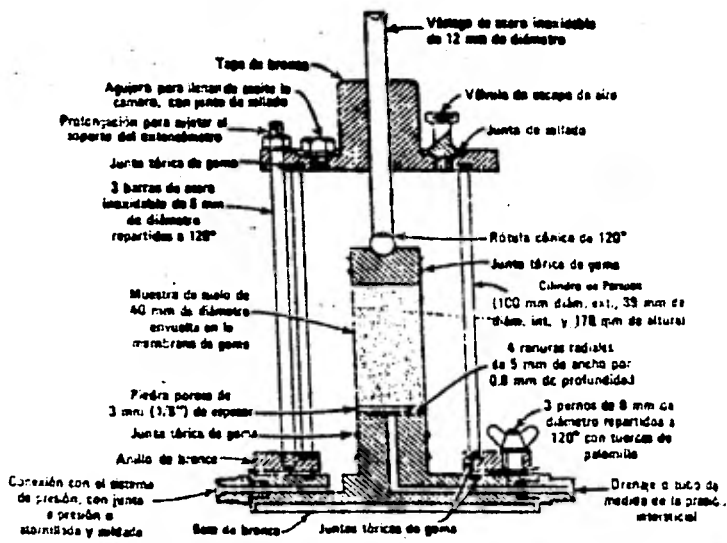
- La prueba triaxial de deformación controlada se realiza presionando un vástago a una velocidad conocida sobre el espécimen y el esfuerzo se mide empleando una báscula hidráulica, la deformación axial se mide utilizando extensómetros.
- La prueba triaxial de carga controlada consiste en aplicar a un vástago de carga, pesos conocidos (esfuerzos) y se van midiendo las deformaciones que sufre la muestra.
- La prueba triaxial de extensión, es aquella en que el esfuerzo vertical normal se mantiene constante y se aumenta la presión de confinamiento hasta que el espécimen falla deformándose hacia arriba, esta prueba es utilizada para simular los esfuerzos de empuje lateral en una masa de suelo.

La prueba de compresión simple es una variante de la prueba triaxial en que la presión de confinamiento inicial exterior es nula por lo que no requiere hacerse en la cámara triaxial. En arenas limpias esta prueba no se realiza por problemas en la preparación de la muestra.

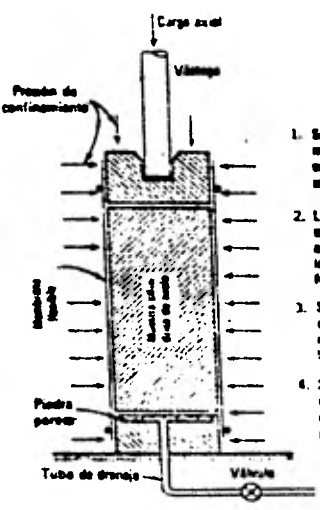
Las arenas limpias presentan problemas de orden práctico para la realización de pruebas en cámaras triaxiales ya que no se pueden hacer -- (preparar) un espécimen apropiado para realizar la prueba, al tratar de preparar la muestra esta se desmorona; pero se puede trabajar con

muestras alteradas, pero su preparación resulta complicada. La dificultad puede subsanarse con muestras secas alteradas usando la prueba del vacío. La esencia de esta prueba consiste en aplicar el esfuerzo lateral σ_c por medio de un vacío que se comunica a la muestra de arena -- previamente envuelta en una membrana de hule; el vacío cumple la misión de proporcionar soporte a la arena impidiendo el derrumbe.

El hecho de que la prueba tenga que ser en muestras alteradas secas no le resta mucho valor práctico a las conclusiones en lo que se refiere a resultados, por ejemplo un análisis de estabilidad de un terraplen o de capacidad de carga de un estrato, pues las características de Esfuerzo-deformación y Resistencia de una arena natural pueden considerarse sensiblemente iguales a la de una muestra alterada en las cuales se hayan reproducidas las condiciones de compactación relativa de campo. Por otro lado da buena idea del comportamiento mecánico de arenas saturadas, similar según se demuestra en la prueba al de arenas secas, siempre y cuando se le considere a la presión efectiva como presión actuante. Si las arenas poseen algo de cementación natural es posible someterlas a pruebas triaxiales convencionales.



Sección de una cámara triaxial típica. (Según Bishop y Henkel, 1962). Ref. 2



1. Se coloca la muestra envuelta en la membrana, sobre el pedestal
2. La muestra envuelta se coloca en la cámara, aplicando la presión lateral de confinamiento
3. Se genera el drenaje de la muestra mediante la válvula inferior
4. Se aplica la carga vertical, mediante el vástago que penetra en la cámara, hasta que se produce la rotura

Detalles principales de una cámara triaxial. Ref. 2

3.2.2. Comportamiento esfuerzo-deformación de los Suelos Granulares.

El estudio del comportamiento a la deformación con suelos granulares, no ha sido tan intenso como el que se ha hecho a los suelos cohesivos.

En los suelos granulares se tenía la idea de que no presentaban problemas serios de deformación, que éstas eran muy pequeñas y ocurrían en forma casi instantánea al aplicar las primeras cargas en un proceso de construcción, deformaciones pequeñas en suelos granulares solo se presentan cuando los niveles de esfuerzo son muy bajos.

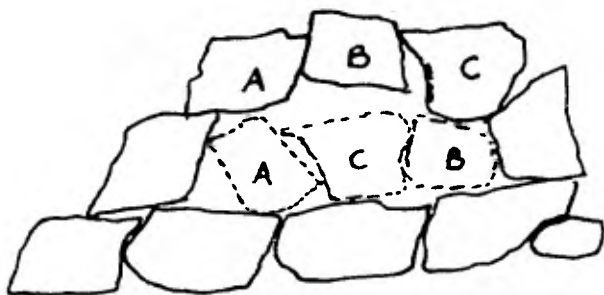
Las deformaciones que tienen una masa de suelo granular es el resultado de los movimientos relativos entre las partículas que componen el elemento y las deformaciones de las mismas en los puntos de contacto entre ellas.

La deformación que tienen los suelos granulares al aplicar un esfuerzo dependen principalmente de dos mecanismos de falla de las partículas que son:

La Distorsión (δ fractura) de las partículas

El movimiento relativo entre partículas.

Por lo general estos mecanismos son dependientes uno de otro. Por ejemplo a una agrupación de partículas como la que aparece en la figura, sería estable bajo ciertas fuerzas aplicadas si las partículas fueran rígidas y no tuvieran libertad de desplazamiento unas respecto a otras, - pero las partículas reales no son rígidas, la deformación de la agrupación dará lugar a ligeros movimientos del sistema, produciéndose el co-



Colapso de una agrupación inestable de partículas

lapso, de esto se deduce que el movimiento relativo entre partículas origina las grandes deformaciones que tienen los suelos granulares, estas deformaciones ocurren a la vez por la distorsión de las partículas del suelo.

3.2.2.1. Deformaciones volumétricas en compresión isotrópica.

Al someter un suelo granular a compresión isotrópica tiene grandes variaciones volumétricas como consecuencia de fallas estructurales locales y, del deslizamiento entre partículas, en consecuencia se originan fuerzas tangenciales en los puntos de contacto. Sin embargo en un plano trazado a través de los puntos de contacto la resultante de las fuerzas tangenciales es nula, de manera que el esfuerzo cortante en cualquier plano puede ser cero y, a pesar de ello, están actuando fuerzas muy grandes en los puntos de contacto.

3.2.2.2. Comportamiento esfuerzo-deformación en compresión confinada de los suelos granulares.

Esta condición tiene gran importancia ya que representa una situación que probablemente es común que se presente en la práctica.

La Figura 1 muestra el comportamiento esfuerzo-deformación en compresión confinada de una arena de tamaño medio. Inicialmente la arena estaba en estado compacto. La deformación que sufre la muestra es vertical, igual a la deformación volumétrica obtenida a partir de la altura original de la muestra. El esfuerzo es la presión vertical.

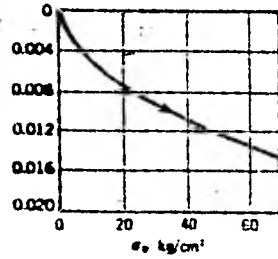
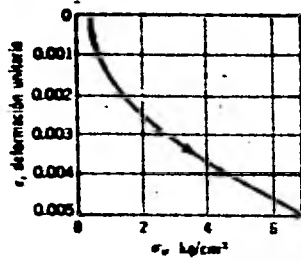
En la gráfica de la figura 1b se ve que el comportamiento-esfuerzo-deformación en compresión confinada de una arena tiene tres fases:

1. Las curvas presentan una concavidad hacia arriba para presiones hasta de 140 Kg/cm². En esta fase la arena se vuelve más rígida al aumentar en nivel de presiones.
2. En esta fase a partir de la presión de 140 Kg/cm², la curva esfuerzo-deformación comienza a presentar una curva inversa, con concavidad hacia el eje de las deformaciones, esto se debe al fracturamiento de las partículas de arena. Lo que permite grandes movimientos relativos entre ellas.
3. En esta etapa la curva tiende a tener concavidad hacia arriba, esto se presenta por la fracturación de las partículas que permiten agrupaciones más compactas. Como el número de partículas aumentan, la fuerza media por contacto decrece y la arena tiende a ser más rígida al aumentar las presiones.

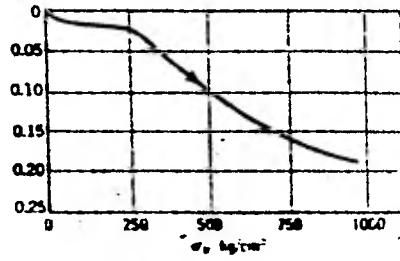
Estos procesos generalmente se producen en la compresión de todos los suelos granulares, aunque raramente en fases tan diferenciadas.

En la figura 2 están los resultados contenidos en varias arenas naturales típicas. La fracturación de las partículas comienza al aplicar las primeras presiones, y la deformación va aumentando cada vez más hasta alcanzar una presión crítica. Esta presión crítica es pequeña cuando el tamaño de las partículas es grande, el suelo está en estado suelto, las partículas son angulosas, la resistencia de los granos es baja y cuando el suelo tiene una granulometría uniforme.

En la mayoría de los problemas de ingeniería los niveles de esfuerzo suelen ser pequeños por lo que la fracturación de las partículas carezca de importancia. En general la fracturación es importante cuando las presiones superan los 35 Kg/cm². Presiones superiores a este valor se presentan en presas de tierra de materiales graduados muy altas y también en algunos otros problemas de ingeniería. En el caso de enrocamientos uniformes y de gran altura la fracturación puede ser muy importante para presiones del orden de 10 Kg/cm².



a



b

Fig. 1
Curvas esfuerzo-deformación, en compresión confinada. Arena de Ottawa, porosidad inicial 0.376
Ref. 2

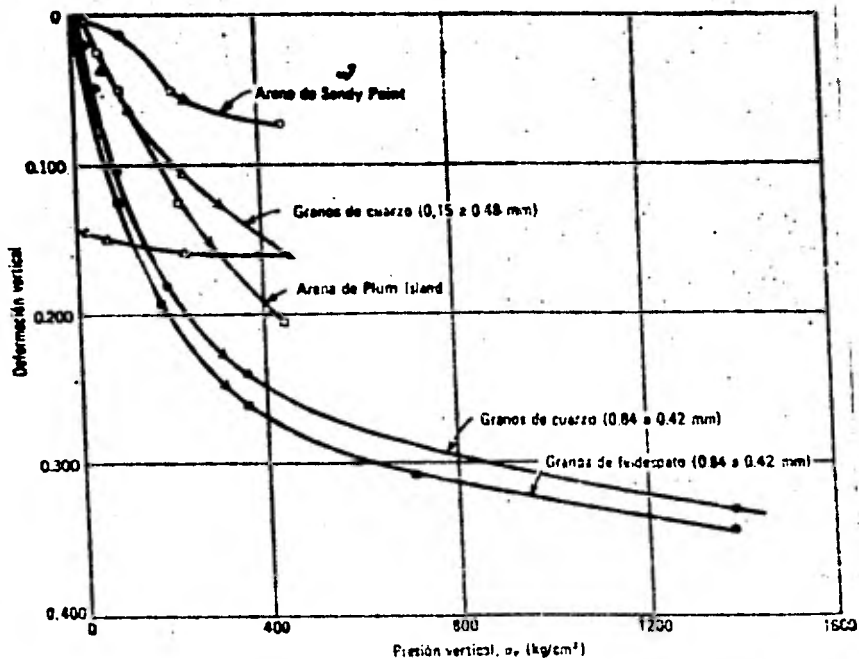


Fig. 2 Resultado de pruebas a compresión confinada en diversas arenas Ref. 2

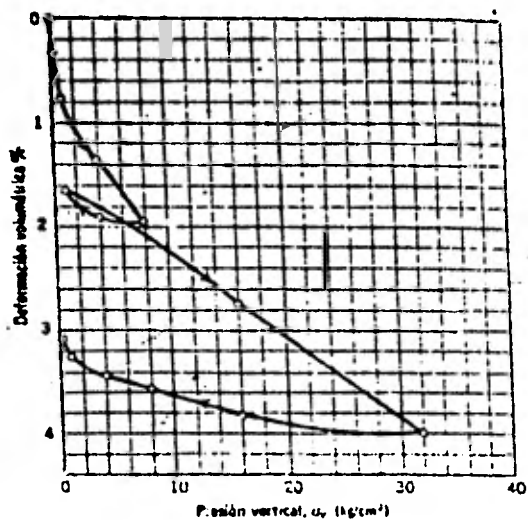


Fig. 3 Resultados en un ensayo de carga y descarga de una arena bien graduada Ref. 2

3.2.2.3 Comportamiento esfuerzo-deformación en compresión-triaxial.

La compresibilidad en los suelos granulares se ha estudiado en mayor variedad de casos y materiales en aparatos de prueba triaxial. La fig. 4 (. Ref. 2 .) muestra una serie de datos comunes de una prueba triaxial realizada en arena.

En la fig. (4) se ve que la relación esfuerzo-deformación presenta una curvatura para deformaciones muy pequeñas, llegando a un máximo para una deformación aproximada del 3%, además se ve que la resistencia del suelo disminuye gradualmente hasta que llega a una resistencia constante y - la deformación continúa.

En el desarrollo de la prueba de compresión triaxial se distinguen - dos etapas de comportamiento al referirse a la deformación del material. - La primera corresponde al proceso de carga, en esta etapa se producen de- formaciones muy pequeñas y generalmente con una disminución de volumen de la muestra, causado por una tendencia que tienen las partículas a adoptar formas estructurales más compactas. La segunda es la etapa de falla, en - ella puede presentarse el máximo de resistencia del suelo. En esta segun- da etapa el comportamiento del suelo granular es diferente de la primera- etapa. Para comprenderla, se basa el estudio a la deformación de una agru- pación plana de esferas rígidas. En la fig. (5 d) se tiene un elemento - unitario de una agrupación de partículas compactas. Cuando a este elemen- to se le aplican cargas verticalmente, sólo puede tener deformaciones si- las esferas C y D se desplazan lateralmente, y al moverse las esferas pro- ducen un aumento de volumen de la agrupación como se puede ver en las fi-

guras (5a y 5b). La fig. (4b) nos muestra que un incremento de volumen - de este tipo se produce al cargar los suelos reales. Lo que muestra que al comprimir una arena ésta aumenta de volumen. (Este es el efecto de dilatación en arenas).

El concepto de encaje que también influye en la resistencia de los suelos granulares se explica en la fig. (6). En la fig. (6a) se ven partículas de suelo deslizándose sobre una superficie lisa, en la que la resistencia al corte viene dada por el ángulo de fricción interna de las partículas. En suelos reales las partículas de suelo están en contacto entre ellas y los planos que pasan por los puntos de contacto están inclinados respecto a la horizontal. Por consiguiente para que se produzca la falla por corte es necesario vencer la fricción que hay entre las partículas y se debe lograr que se desplacen las partículas unas respecto a otras, este proceso se observa en las figuras 6b y 6c. De estas figuras se deduce que la resistencia al corte de una masa de suelo granular real se compone de dos partes: una cuya magnitud viene dada por ϕ_i (ángulo de fricción entre las partículas) y otra que es la que depende del grado de encaje, cuanto mayor sea el encaje mayor será la resistencia al corte.

Por lo dicho anteriormente sobre los conceptos de dilatación y encaje entre partículas, la relación de vacíos tiene gran influencia sobre las curvas esfuerzo deformación obtenidas en pruebas de compresión triaxial. En las gráficas de la fig. 7 para una muestra de arena fina compacta, la curva que relaciona el esfuerzo desviador con la deformación axial muestra un máximo y el esfuerzo disminuye a partir de este punto.-

Además la muestra aumenta de volumen al sufrir la deformación.

Por otro lado la curva correspondiente al estado más suelto de la muestra no presenta un máximo y el esfuerzo desviador permanece casi constante al continuar la deformación, una vez que se ha alcanzado la resistencia máxima. En este caso al recibir la muestra el esfuerzo, primeramente disminuye el volumen, dilatándose a continuación y por último termina practicamente con el volumen inicial.

De acuerdo a los conceptos de encaje y dilactancia se puede deducir los siguientes comportamientos en suelos granulares.

- 1.- Cuanto más compacta es la arena, mayor es el grado de encaje y por tanto el esfuerzo desviador y el ángulo de fricción entre las partículas.
- 2.- Cuanto más compacta es la arena, mayor es el incremento de volumen.
- 3.- Al expanderse la arena la resistencia a la deformación disminuye.
- 4.- Esta disminución es más marcada en muestras de arena más compactas.

Al terminar el proceso de prueba sobre la arena el grado de encaje entre las partículas ha disminuido hasta un punto tal en que la deformación por corte puede aumentar sin que se incremente el volumen.

La relación de vacíos en la fase final es independiente de la relación de vacíos inicial, antes de comenzar la prueba de corte en el material.

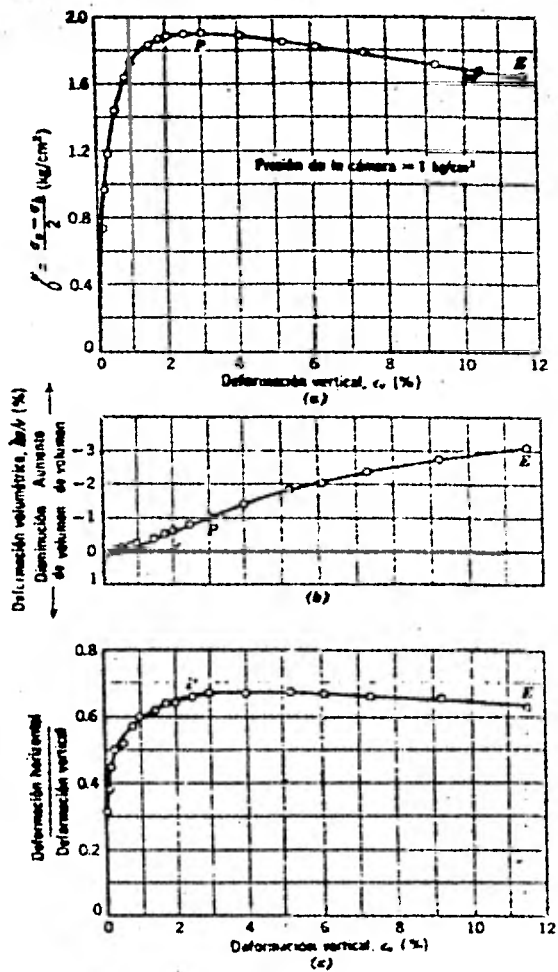


Fig 4 Resultados de una prueba de compresión triaxial en una arena calcárea bien graduada de Libia. Ref. 2

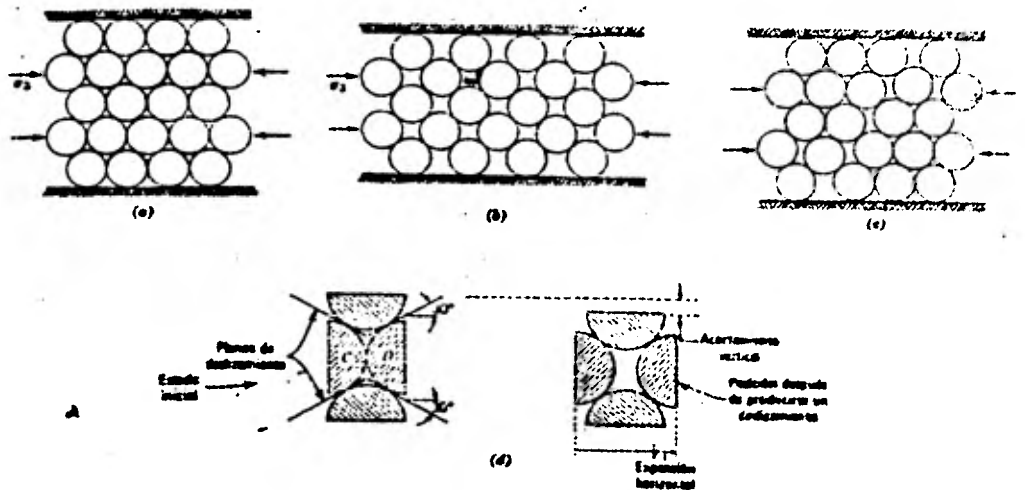


Fig. 5
 Deformaciones en una agrupación irregular de esferas. a) Agrupación inicialmente compacta. b) Estado más suelto posible deformaciones uniformes. c) Estado suelto deformaciones no uniformes. d) Comportamiento de unidad elemental.

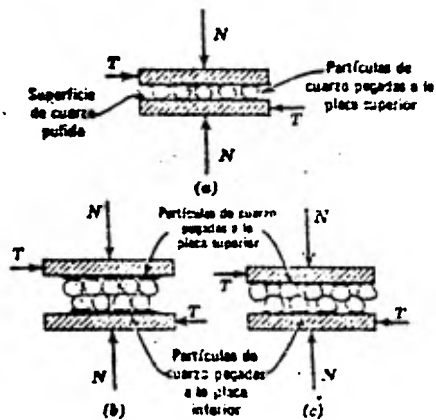


Fig. 6
 Ejemplos de encaje entre superficies. a) Superficie de deslizamiento lisa, b) Superficies ligeramente encajadas, c) Superficies muy encajadas.

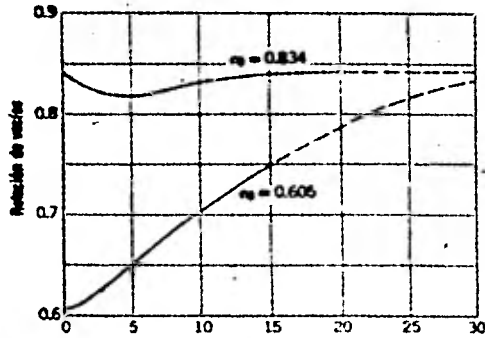
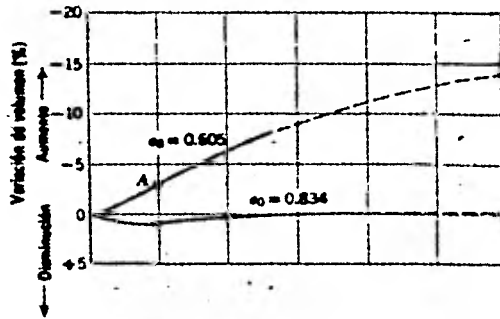
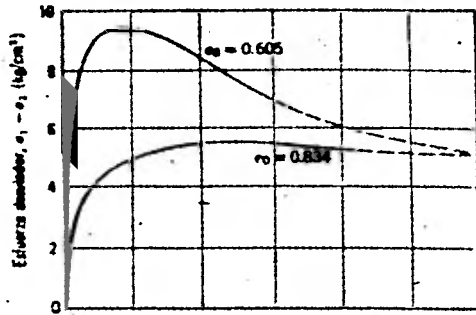
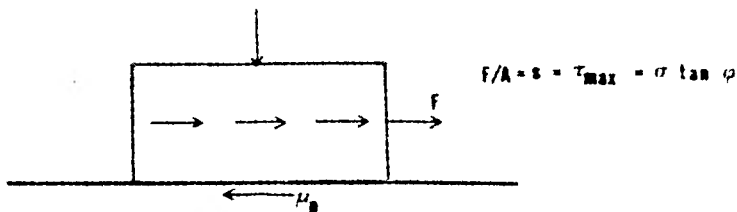


Fig. 7
 Curvas esfuerzo deformación para muestras sueltas y compactas de arena fina a media. $\sigma_2 = 2.1$ kg/cm² $e_0 = 0.605 \approx 100\%$ Dr. $e_0 = 0.834 \approx 20\%$ Dr. Línea continua datos reales; línea de trazos, extrapolaciones basadas en resultados de otras pruebas (Según Taylor, 1948) Ref. 2

3.2.3 - Resistencia al esfuerzo cortante de los suelos granulares.

Para el estudio de resistencia al esfuerzo cortante de los suelos granulares se parte de los conocimientos de dinámica, ya que la resistencia al cortante depende de la fricción que hay entre los granos del material.



Principio de la fricción mecánica

Para los suelos granulares la ley de fricción mecánica se puede aplicar considerando a una masa de partículas discretas que actúan en los puntos de contacto en la superficie de deslizamiento. Si las partículas son pequeñas los puntos de contacto aumentan y las presiones en ellos serán menores. De aquí que la resistencia en los puntos de contacto toma interés al relacionarla con la resistencia individual de los granos ya que estos pueden llegar a romperse.

Las características de los suelos granulares tienen gran influencia en la resistencia al cortante, y las de más importancia son:

- Forma de los granos
- Compacidad
- Distribución granulométrica
- Resistencia individual de las partículas
- Tamaño de las partículas

También la forma como se hace llegar el material a la falla, dependiendo del tipo de prueba y los esfuerzos a que se someta el material - tienen gran influencia en la resistencia al esfuerzo cortante de los materiales

En la figura No. 8 se tienen las curvas esfuerzo-deformación para tres muestras diferentes de la misma arena.

Se puede ver en esta figura que para una arena suelta el tipo de falla es plástica, ya que la deformación crece cuando se incrementa el esfuerzo. El esfuerzo se incrementa hasta un valor límite que se conserva y la deformación sigue aumentando.

Para la muestra de arena compacta la curva esfuerzo-deformación corresponde a una falla de tipo frágil; en esta curva se observa que el esfuerzo llega a un máximo, a partir del cual empieza a disminuir al aumentar la deformación, el esfuerzo baja a un valor último y la deformación sigue creciendo.

La curva que se obtiene en la arena cementada también presenta un comportamiento de falla frágil, en la que se tiene una disminución rápida del esfuerzo al crecer la deformación. Al crecer la deformación se llega a valores de esfuerzo semejantes a la de los casos anteriores.

Al aplicar un esfuerzo cortante en arenas sueltas se tiene que el desplazamiento que ocurre a lo largo de un plano interno de la masa de suelo, las partículas no se traban ni se bloquean entre si, lo que la única resistencia que se opone a la deformación es la fricción.

En las arenas compactas además de la fricción, se opone a la deformación un conjunto de efectos debidos, a la trabazón entre partículas - que bloquea todo movimiento que se trate de provocar en ellas.

De las pruebas de laboratorio efectuadas a ciertas arenas en diferentes condiciones ya sea suelta, compacta o cementada se han obtenido - curvas de resistencia al corte, que son típicas en cada caso.

En la figura (9) se observa que para una arena suelta la línea de - resistencia es una recta que pasa por el origen, de lo que se deduce que la resistencia al corte se obtiene con la siguiente expresión.

$$\tau = \sigma \tan \phi_s$$

donde ϕ_s es el ángulo de fricción interna de la arena en estado suelto, - ϕ_s se obtiene en el laboratorio.

En la figura (9) se observa que para una arena compacta si se si- - guen los puntos obtenidos se obtiene una curva de resistencia que es cón - cava hacia abajo, para fines prácticos suele asimilarse a una línea rec- - ta, por lo que la resistencia al corte queda definida por

$$\tau = \sigma \tan \phi_c$$

en donde ϕ_c es el ángulo de fricción interna de la arena compacta, que - además involucra la trabazón que existe entre las partículas del suelo, - por lo que ϕ_c será mayor que ϕ_s

Se ha observado que para presiones muy altas ϕ_c y ϕ_s tienden a ser - iguales y el efecto de trabazón entre los granos pierde importancia en - comparación de la magnitud de la fricción.

En la misma figura se tiene que la línea de resistencia de la arena cementada queda fuera del origen y la expresión que define la resistencia al cortante es

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

donde c y ϕ son parámetros que se calculan en el laboratorio y varían con el nivel de esfuerzo y con el intervalo de presiones considerado.

Cuando se trabaja con arenas saturadas, la deformación y resistencia al corte, dependen principalmente del grado de saturación, ya que se puede presentar una "cohesión aparente" por la capilaridad producida intersticial. En arenas húmedas si se someten a un efecto de vibrado éstas tienden a aumentar de volumen, con lo que aumenta también la relación de vacíos en estado seco. Al aplicar la vibración en arenas húmedas las partículas cambian de posición aumentando el volumen pero por la humedad que existe se forman presiones capilares que hacen que las partículas permanezcan en su nueva posición de equilibrio aparente inestable. En las arenas secas esto no ocurre y al aplicar la vibración las partículas pasan de esas posiciones inestables intermedias a otras finales aún más estables que las originales, produciendo una compactación del conjunto.

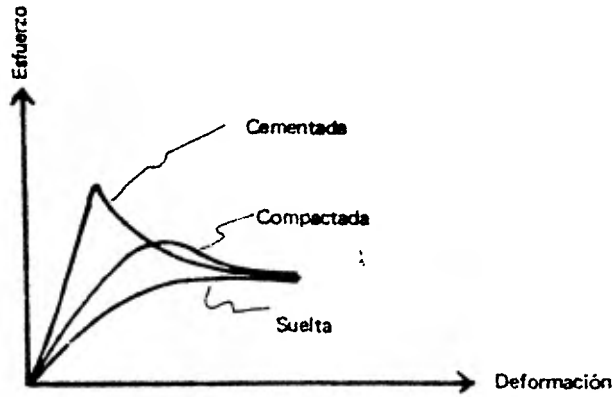


Fig. 8. Gráfica esfuerzo-deformación en tres muestras Ref. 1

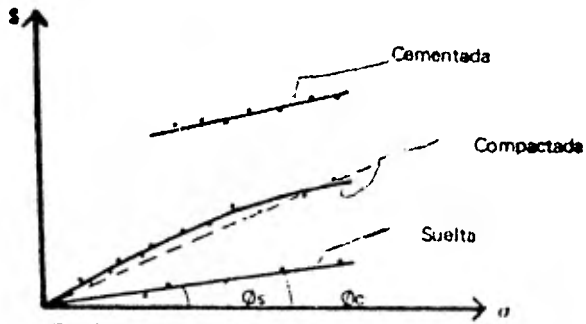


Fig. 9. Líneas de resistencia para una arena en estado suelto, compacto y sementado Ref. 1

CAPITULO CUARTO

COMPACTACION DE SUELOS

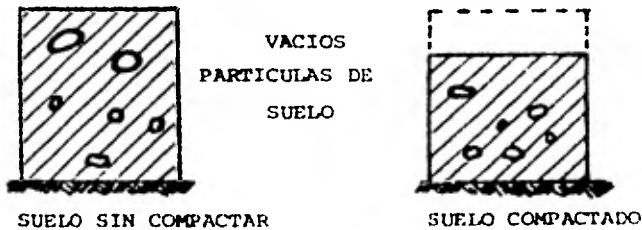
4.1. INTRODUCCION

La reducción de vacíos en mecánica de suelos recibe varios nombres por la forma de lograr esta reducción, estos procesos son: consolidación, compactación, densificación, etc.

Entre la consolidación y compactación existen ligeras diferencias, ya que los dos procesos tienden al mismo fin.

La consolidación es la reducción de vacíos de un suelo, debido a la acción de una carga estática que provoca expulsión de aire y agua - por un proceso de difusión a través del tiempo, por ejemplo la reducción de vacíos en el suelo bajo un edificio.

El proceso de compactación es la reducción de vacíos, más o menos rápida, producido por medios mecánicos, que hace que se tengan cambios de volumen fundamentalmente por pérdida de volumen de aire, -- pues por lo general no se expulsa agua en el proceso de compactación.



De lo anterior se puede definir que la compactación es el aumento del peso volumétrico del suelo, por medio de equipos mecánicos. Esto se logra por la reducción de vacíos al conseguir un mejor acomodo de las partículas del suelo y la expulsión de aire y/o agua del material.

El objetivo principal de la compactación es mejorar las características de un material en lo que se refiere a: resistencia a los asentamientos bajo cargas futuras, resistencia a esfuerzos mecánicos y mejorar la permeabilidad de los materiales. Las obras a las que se les aplica las técnicas de compactación son: carreteras, ferrocarriles, aeropistas, rellenos artificiales, como las presas de tierra y materiales graduados (Presa Hidroeléctrica de Chicoasén en Chiapas), diques, etc.

Estas estructuras deberán, después de haber sido compactadas, resistir su propio peso y el peso de las cargas que actuarán sobre ellas.

De acuerdo a las obras que necesitan de compactación, las propiedades de los materiales que se deben obtener son diferentes para cada caso, ya que en unos se buscará resistencia a la deformación, la permeabilidad, resistencia a la acción de agentes erosivos, etc.

De acuerdo a los objetivos de la compactación se deben de prevenir muchas de las dificultades que se presentan en las técnicas de compactación. Se tiene pues que la compactación es un proceso de objetivos múltiples y se tiene que muchos de estos objetivos serán contradictorios en muchos problemas concretos en el sentido de que ciertas propiedades pudieran perjudicar a otras. Por ejemplo, en un material una compacta-

ción muy intensa lo hace resistente, pero sin duda muy susceptible al agrietamiento como en este caso se pueden presentar muchos otros.

De lo anterior, el problema de la compactación de suelos se tiene que ligar al control de calidad de los trabajos de campo, ya que al realizar una compactación en un suelo hay que verificar si con él se logran los fines propuestos.

Desde los primeros años de las técnicas modernas de compactación, la experiencia de los ingenieros indicó que existía una correlación entre las propiedades fundamentales del suelo y el peso volumétrico seco a que llega el material al compactarlo. En el que al obtener un mayor peso volumétrico seco se alcanza una situación más favorable de las propiedades del suelo, ya que la prueba de peso volumétrico seco es fácil de -- realizar se tomó como base para determinar la compactación de los suelos. La correlación entre las propiedades fundamentales de los suelos y el peso volumétrico seco es muy confiable y en la mayoría de los trabajos de compactación se toma como norma sin tomar en cuenta los fines -- que se persiguen en cada caso particular de compactación, lo que trae consigo que se cometan errores en las aplicaciones prácticas de las técnicas de compactación.

Por lo que la obtención de un peso volumétrico seco mayor es solamente un medio para obtener el mejoramiento de las propiedades de un suelo, se debe de tener cuidado en la interpretación de la correlación de peso volumétrico seco y las propiedades fundamentales de los suelos para

no cometer errores al dar una compactación en el que el suelo debe presentar ciertas características.

En la época moderna la compactación tuvo su gran desarrollo en los últimos años del siglo pasado y en los primeros del presente, principalmente en los Estados Unidos. En el año de 1906 apareció el rodillo pata de cabra de Fitzgerald de 2000 kg. que originó el desarrollo de estos equipos. En los Estados Unidos en la Dirección de Carreteras de California entre los años de 1928 y 1933 se realizan las primeras investigaciones básicas de laboratorio y estudios de campo que hicieron posible se aplicaran en las técnicas de uso actual.

Después de estos primeros años, se hizo posible un desarrollo de los equipos de compactación y se han investigado bastante las propiedades de los suelos compactados y las técnicas de campo y laboratorio se han ido perfeccionando.

Se ha logrado que la compactación sea uno de los métodos más eficaces para mejorar las condiciones de un suelo que ha de usarse en la construcción. Es de aplicación rápida y sencilla de acuerdo a las condiciones en que estará expuesto el suelo.

Los resultados obtenidos de un proceso de compactación dependen de varios factores, unos dependen del tipo de suelo y otros del método de compactación empleado y, por último, los que se refieren a determinadas circunstancias que prevalecen en el suelo en el momento de compactarse.

A continuación se presentan algunos factores o variables que afectan

un proceso de compactación.

- a) La naturaleza del suelo
- b) El método de compactación
- c) La energía específica
- d) El contenido de agua del suelo
- e) La forma de llegar a la humedad óptima de compactación
- f) El contenido de agua original del suelo
- g) La recompactación
- h) La temperatura

a) La naturaleza del suelo influye en la decisión, para la técnica de compactación que se empleará, prevalece la distinción entre -- suelos finos y gruesos.

b) El método de compactación usado ya sea en el campo o en el laboratorio, en el laboratorio se tiene:

compactación por impacto

compactación por amasado

compactación por aplicación de carga estática

compactación por vibración

En el campo no se tienen esta clasificación, es común describir esto - en base al equipo empleado para la compactación, así se habla de compactación con rodillo liso, con rodillo de neumáticos, con rodillo pata de cabra, con equipo vibratorio, etc. Los métodos de laboratorio repro-

ducen las condiciones de campo, pero en algunos casos no es posible - establecer una correlación entre los trabajos de campo y laboratorio.

c) La energía específica de compactación es la que se da al suelo por unidad de volumen, durante un proceso mecánico que se trate. En el Laboratorio se valúa la energía específica por medio de una compactación por impactos dada por un pisón, la energía se expresa por medio de la siguiente fórmula.

$$E_c = \frac{NnWh}{V}$$

donde:

E_c = Energía específica

N - Número de golpes del pisón compactador por cada una de las capas de suelo en que se acomoda.

n - número de capas que se dispone hasta llenar el molde

W - Peso del pisón compactador

h - altura de caída del pisón al aplicar impactos al suelo

V - Volumen total del molde de compactación, igual al volumen total del suelo compactado.

d) El contenido de agua del suelo es importante para la obtención de los pesos volumétricos secos, a partir de valores bajos de contenido de agua, se van obteniendo pesos volumétricos secos altos, hasta un cierto valor de la humedad en que empiezan a disminuir los pesos volumétricos secos logrados, Es decir que para un suelo dado y usando un

cierto procedimiento de compactación, existe un contenido de agua de compactación, llamado el óptimo, que produce el máximo peso volumétrico seco que es el que se debe obtener en un proceso de compactación'

e) En el laboratorio se realizan pruebas de compactación a partir de un suelo relativamente seco al que se le va agregando agua o - si se puede parte de un suelo húmedo que se va secando al avanzar la prueba, estas pruebas se grafican en coordenadas cartesianas en el eje de las abscisas la humedad (ω) y en el de ordenadas el peso volumétrico seco (P_s). Los experimentos muestran que en el primer caso se obtienen pesos específicos secos mayores que en el segundo, para un mismo suelo y los mismos contenidos de agua.

f) El contenido de agua original del suelo, se refiere a que si hay que agregar o quitar agua para obtener la compactación deseada de acuerdo al contenido de agua óptimo que se requiere para compactarlo.

En la compactación de campo el contenido de agua original del suelo no solo ejerce gran influencia en la respuesta del suelo a los equipos de compactación, sino también en el comportamiento futuro de la masa compactada, por lo que es aconsejable buscar condiciones de humedad natural que no se aparten mucho del óptimo.

En el laboratorio, el contenido de agua original del suelo, influye en las compactaciones que se logran con una cierta energía a humedades menores de la óptima, sobre todo cuando se compacta el suelo inmediatamente después de la incorporación de agua, pues si es un suelo -

originalmente seco, el agua añadida producirá una mayor diferencia inmediata entre las condiciones de humedad interna y externa de -- los grumos que en otro que originalmente sea húmedo, por ello es - de esperar que los pesos volumétricos secos que se obtienen sean ma yores cuando los contenidos de agua del suelo sean menores.

g) Cuando se utiliza la misma muestra de suelo para la obtención de puntos sucesivos de pruebas de compactación ello implica -- una continua recompactación del mismo suelo, se ha comprobado que - ésta práctica es inconveniente, ya que si se trabaja con suelos recompactados los pesos volumétricos que se obtienen son mayores que los que se logran con muestras de suelo vírgenes en igualdad de circunstancias.

h) La temperatura afecta los procesos de compactación de campo, en primer lugar por efecto de evaporación del agua incorporada o condensación de la humedad ambiente del mismo, o el aumento del - contenido de agua por lluvia cuando no se sella el material que se esté compactando; si queda muy húmedo hay que retirar el material y colocar otro con la humedad óptima.

Existen otras variables que afectan a la compactación de campo y de laboratorio, tales son el espesor de las capas, el número de pasadas sobre un mismo punto, el golpear las muestras con el pisón compactador en el laboratorio, etc.

La eficiencia con que la energía de compactación se aplica a los sue

los es importante, pero su cuantificación es deficiente.

Las gráficas con que se representa la compactación de los suelos, la presente proctor, y en ella se va viendo los cambios del peso volumétrico seco al compactar el suelo con diferentes contenidos de agua, utilizando muestras del mismo suelo, que proporcionan cada una de los puntos de la curva. Si se utilizan diferentes procedimientos de compactación para un mismo suelo, se tendrá varias curvas de compactación, correspondientes a cada una de las formas de compactar el suelo, sea en el campo o en el laboratorio.

Una representación $P_d - \omega$ (peso volumétrico seco- Contenido de agua) recibe el nombre de "curva de compactación". Pero esta gráfica no constituye el único medio de representar los resultados de un proceso de compactación.

La forma más común de una gráfica que representa los resultados de la compactación de un suelo, sea cual fuere el procedimiento de compactación, es la representada en la figura (10)

En la curva se ve un punto máximo, que es el que corresponde a un peso volumétrico seco y a una cierta humedad de la muestra. Estos reciben los nombres de "peso volumétrico seco máximo" y el de "humedad óptima", que son los resultados que se tendrán que obtener al realizar una compactación de campo.

La "Humedad óptima" es el contenido de agua con el cual el procedimiento de compactación que se use dará la misma eficiencia, si esta no - -

juza por el peso volumétrico seco máximo que se logre.

La curva $\gamma_d - \omega$ se dibuja utilizando la siguiente fórmula:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{1 - \omega}$$

γ_d = Peso volumétrico seco

γ_m = Peso volumétrico de la masa de suelo

ω = Contenido de agua en %

En la figura (10) se tiene también la curva correspondiente al 100% de saturación del suelo en cada caso. La condición de un suelo compactado en condiciones normales es la de un suelo no saturado, razón por la cual la curva de compactación se desarrolla bajo la curva de saturación, comparando las dos curvas se observa cual es el contenido de agua correspondiente a una cierta abscisa de la curva, se aplica la fórmula correspondiente a suelos saturados:

$$\gamma_d = \frac{s_s}{1 + \omega s_s} \gamma_w$$

γ_d = Peso volumétrico seco

s_s = Peso específico relativo de sólidos

γ_w = Peso volumétrico del agua

ω = Contenido de agua en %

Al realizar pruebas de compactación dinámicas en arenas limpias, si se representan en una gráfica de $V_g - \omega$, forma una curva de compactación como la que aparece en la Figura (11)

Esta forma de la curva es típica de las pruebas dinámicas que se aplican a materiales suficientemente permeables para que no se desarrollen presiones de poro en el interior del suelo durante el proceso de compactación, una curva como la de la figura (11) no define en forma clara el peso volumétrico seco máximo ni la humedad óptima; pero desde el punto de vista práctico, es el único que tienen vigencia dos conceptos anteriores.

Para obtener curvas de forma visual de suelos como arenas limpias o a mezclas de arenas y gravas sin finos se hacen pruebas de compactación por vibración, estas pruebas son más satisfactorias desde el punto de vista de representar el proceso de una curva de compactación que de el peso volumétrico seco máximo y la humedad óptima.

La eficiencia para realizar un trabajo de compactación depende varios factores y para tener un conocimiento de estos es necesario disponer de procedimientos estandarizados que reproduzcan los procesos de compactación en el laboratorio en forma representativa. Por esto las pruebas de compactación de laboratorio y los estudios realizados en el mismo en torno a los procesos de compactación, son de suma importancia para realizar un buen trabajo de compactación de campo, ya que los trabajos de campo involucran costos muy altos, por lo que los estudios para un proyecto habrán de hacerse con base a los trabajos de laboratorio, esta afirmación no se invalida por el hecho de que en la técnica actual se haga un uso cada vez más extenso de los terraplenes de prueba, en que se investigan modelos a escala natural para obtener normas de proyecto.

Se deduce que los trabajos de compactación han de estudiarse con referencias a técnicas de campo y de laboratorio, y así investigar las propiedades que es posible obtener de los suelos compactados.

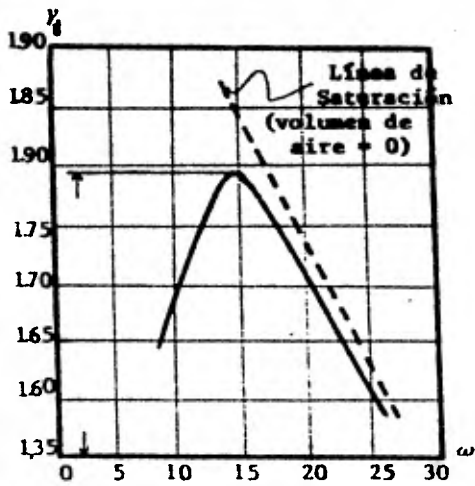


Fig. (10) Curva de Compactación Típica Ref. (3)

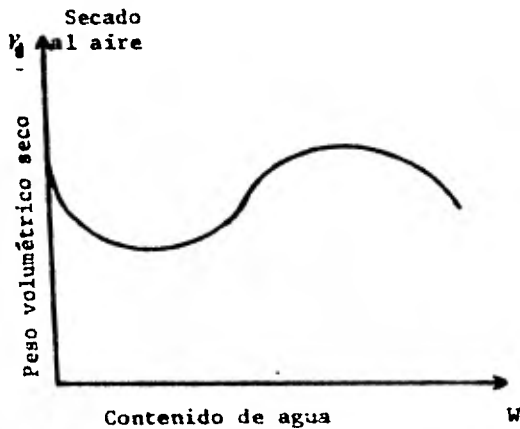


Fig. (11) Curva de compactación obtenida en prueba dinámica en arenas limpias y gravas arenosas Ref. (3)

4.2. PROCESOS DE COMPACTACION DE CAMPO

La compactación de suelos en el campo, se hace con equipos mecánicos que tienen diferentes pesos y tamaños, y diferentes formas de aplicar la energía de compactación al suelo, para obtener o mejorar las propiedades que se requieren de él.

Para entender la forma en que el equipo mecánico transmite esfuerzos de compresión en el suelo, consideremos una placa rígida, circular, de área "A", colocándola sobre un suelo, aplicando sobre la placa -- una carga "l", dando una presión de contacto "P" (Figura 12.1).

Al recibir la presión el suelo, se desarrollan presiones en el interior del mismo, si se unen los puntos que tienen la misma presión, -- se forman una superficies llamadas, bulbos de presión.

En la (Figura 12.2) se observa que, al aumentar el tamaño de la placa pero manteniendo la presión constante, se tiene que la profundidad del bulbo de presión aumenta. En la (Figura 12.3) se ve que si se aumenta la presión y el área permanece constante, la profundidad del bulbo no aumenta significativamente, pero la presión, y por tanto la energía de compactación sí aumenta.

Si la compactación que se está realizando se está haciendo por capas de un determinado espesor, y con un cierto equipo mecánico, se deduce que las figuras (12.2 y 12.3) que es necesario controlar el espesor de las capas para tener la suficiente presión en el suelo para obtener la compactación deseada.

De la (Figura 12) se concluye que no se debe de aumentar el espesor de la capa de compactación simplemente lastrando excesivamente el -- equipo de compactación. Por lo que para aumentar el espesor de la capa, se debe de cambiar el equipo por otro de mayor superficie de contacto con el material aunque la presión permanezca constante.

La teoría de los bulbos de presión fué desarrollada para un medio -- elástico, para fines prácticos todos los suelos se consideran elásticos por lo que la teoría de los bulbos de presión es aplicable a tales materiales.

Los esfuerzos mecánicos empleados en la compactación de campo, son -- una combinación de uno o más de los siguientes efectos.

- a) Por amasado. Acción de amasado, reorientación de partículas próximas, causando una reducción de vacíos.
- b) Por presión estática. La aplicación de una fuerza por unidad de área.
- c) Por impacto Golpeo con una carga de corta duración, alta ampli-
tud y baja frecuencia.
- d) Por vibración Golpeo con una carga de corta duración, baja ampli-
tud y alta frecuencia.
- e) Métodos Mixtos
- f) con ayuda de enzimas

Estas formas de compactar dan la energía de compactación que se requiere para compactar diferentes tipos de suelo, ya que cada uno aplica diferentes



Fig. 12.1

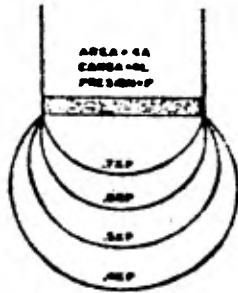


Fig. 12.2



Fig. 12.3

Fig. 12. Bulbos de presión Ref. (7)

tes esfuerzos y la duración de los mismos es diferente.

Con los tres primeros se aplican los métodos convencionales en uso desde hace varios años y las tres últimas son técnicas más recientes, que se están usando mucho en los últimos años.

a) El equipo empleado para la compactación por amasado es el rodillo pata de cabra, en la actualidad hay otros como el rodillo de almohadillas y el segmentado.

Estos equipos ejercen presiones muy grandes en el suelo al estar pasando sobre ellos para lograr la compactación.

La compactación por amasado se realiza solo en suelos cohesivos como las arcillas, etc.

El efecto que produce un rodillo pata de cabra en el material es que - al penetrar la punta de pata de cabra ejerce presión hacia todos lados, obligando al agua y/o al aire a salir por la superficie. Conforme se - van dando pasadas el material se va compactando. Las patas penetran ca da vez menos en el suelo y llega un momento en que no se produce una - compactación adicional. La superficie que deja el rodillo pata de ca-- bra es distorsionada, pero sirve de liga para la siguiente capa por com pactar.

La compactación con rodillo pata de cabra se lleva a cabo de abajo hacia arriba; es decir que las capas inferiores se van compactando primero y las capas superiores posteriormente.

La compactación por amasado es estudiada en los equipos de compactación

de Laboratorio, a fin de lograr una mayor representatividad en pruebas que se realizan sobre suelos que se compactan con rodillos pata de cabra, almohadillas, etc.

La compactación por amasado es muy deseable en terraplenes de suelos finos, en el corazón impermeable de las presas de tierra y enrocamiento, ya que con este método se obtiene una buena compactación en estos materiales.

b) La compactación por presión estática, se basa en aplicar presiones más o menos grandes sobre la superficie del suelo.

La acción de la compactación por este medio es de arriba hacia abajo, es decir que las capas superiores se compactan primero que las capas de abajo.

Si se quiere realizar una compactación rápida, este método presenta -- algunos problemas según el material que se compacte.

Para materiales cohesivos la acción de compactación de arriba hacia abajo, presenta el inconveniente que la parte superior se compacte primero y que el esfuerzo compactante debe de atravesar la parte ya compactada, para poder compactar la inferior. Se consume por tanto mayor energía de compactación.

Para suelos granulares, sucede que las características granulométricas varían, debido a la sobrecompactación de la parte superior de la capa, produciendo rotura o deformación de las partículas en esta capa. También la fricción interna del material granular aumenta y ejerce mayor resistencia.

Para disminuir la resistencia a la fricción interna se le puede agregar agua al material y realizar la compactación.

Los equipos de compactación de campo que transmiten presión son:

- | | |
|------------------------|-----------------|
| a) Rodillos lisos | Remolcados |
| b) Rodillos neumáticos | Autopropulsados |

a) Los rodillos lisos se utilizan en la compactación de materiales - que no requieren concentraciones elevadas de presión por no formas -- grumos o no ser necesaria la disgregación, por lo general se emplea en arenas y gravas relativamente limpias, también se usan para el aca bado de las superficie ya compactadas.

b) Los rodillos neumáticos, ejercen una presión definida a la superficie del suelo, por lo general, es la presión de inflado de la llanta. El rodillo aplica a la superficie de la capa prácticamente la mis ma presión desde la primera pasada.

Los rodillos neumáticos se usan principalmente en suelos arenosos con finos poco plásticos, en los que no sea necesario grandes concentra-- ciones de presión, en limos poco plásticos también son eficientes los rodillos neumáticos.

c) La compactación por impacto se realiza al dejar caer un peso so-- bre el suelo repetidas veces desde una cierta altura. El principio en que se basa es que al levantar un peso (cuerpo) una cierta distancia sobre la superficie de un suelo y se deja caer, la presión ejercida, es varias veces mayor que la presión que ejerce el mismo peso estando -- apoyado sobre dicha superficie.

La compactación por impacto está limitada a determinadas partes en que los equipos grandes no pueden compactar, tales como zanjas, desplantes de cimentaciones, áreas adyacentes a obras de drenaje o estribos de puentes etc.

Los equipos con lo que se logra esta compactación son los pisones, bailarinas y los rodillos apisonadores.

Los pisones se fabrican con pesos desde 30 kg. hasta 1,000 kg.

El mejor rendimiento de los rodillos apisonadores se logra en suelos finos con abundante contenido de grava y guijarros o en suelos finos residuales que contengan fragmentos de roca parcialmente intemperizados.

d) Compactación por vibración. Este tipo de compactación es el que últimamente ha tenido mayor desarrollo y prácticamente ha invadido todos los materiales por compactar.

La compactación por vibración vence los nexos y resistencias entre partículas que se producen tanto en suelos gruesos como en suelos finos.

El efecto de vibración se hace por mecanismos ya sea del tipo de masas desbalanceadas o del tipo hidráulico pulsativo, que proporcionan un efecto vibratorio al elemento compactador.

La frecuencia de vibración tiene un intervalo óptimo según se ha estudiado, que está comprendido entre 0.5 y 1.5 veces la frecuencia natural del suelo, lo que lleva al equipo a frecuencias prácticas del orden de 1,500 a 2,000 ciclos por minuto.

Los factores que influyen en los resultados queda un equipo de compactación por vibración son los siguientes:

- 1) La frecuencia, esto es, el número de revoluciones por minuto del oscilador.
2. La amplitud, generalmente medida por una distancia vertical en ca si todos los equipos comerciales.
- 3) El impulso dinámico que se genera en cada impulso del generador.
- 4) La carga muerta, es decir el peso del equipo de compactación, sin contar el oscilador propiamente dicho.
- 5) La forma y el tamaño del area de contacto del vibrador con el suelo.
- 6) La estabilidad de la máquina.

Los procedimientos de compactación de campo combinan siempre la vibración con la presión, la vibración utilizada sola resulta poco eficiente, la presión es necesaria para vencer los nexos interparticulares que se producen en los suelos.

La compactación por medios vibratorios es más eficiente en los suelos granulares que, en los finos. En suelos granulares se han compactado - capas de gran espesor, en los suelos finos el contenido de agua es determinante; las arcillas poco húmedas necesitan grandes energías de -- compactación y los equipos deben de ejercer grandes presiones adicionales. Esto hace que el espesor de la capa sea menor que en el caso de las arenas u otros suelos friccionantes. Las arcillas húmedas pueden - compactarse con energías y presiones adicionales menores que las utilizadas para la compactación de arcillas secas.

VENTAJAS DE LA COMPACTACION POR VIBRACION

- 1) Se facilita la obtención de los últimos porcentos del grado de compactación, que son muy difíciles de obtener, se obtienen más rápido densidades altas.
- 2) Permite el uso de compactadores más pequeños.
- 3) Se puede trabajar sobre capas de material de mayor espesor.
- 4) Permite hacer trabajos más rápidos por menor número de pasadas.
- 5) Los costos de compactación resultan más económicos.

e) Compactación por métodos mixtos. La tecnología ha desarrollado un gran número de equipos en los que se combina la presión con la vibración, y se busca combinar otras acciones de compactación.

Estos equipos se utilizan en la mayoría de los materiales ya sean suelos gruesos o finos y se obtienen resultados de compactación buenos, obteniendo pesos volumétricos secos muy cerca del máximo y el peso volumétrico seco máximo en algunos casos.

De los equipos más usados actualmente en que se combina la presión con la vibración, se tiene a; los rodillos lisos con tres ruedas con vibración en la llanta delantera, los pata de cabra (remolcados y autopropulsados), los rodillos de almohadillas con llantas neumáticas en la parte trasera, los rodillos lisos con llantas neumáticas en la parte trasera, etc.

f) La compactación con ayuda de enzimas se logra mediante la adición de productos enzimáticos en el agua que se agrega al suelo para la compactación, se ha pretendido combinar con algún otro esfuerzo compactador mecánico, para obtener la densificación más rápida de los materiales.

Las enzimas son sustancias químico orgánicas, 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.

Las enzimas para compactación hacen que las partículas del suelo se agrupan y se transformen en una masa compacta y firme. Se hace notar que el agregar, productos enzimáticos en el agua de compactación no densificará al material tratado, si no que es necesario aplicar un esfuerzo de compactación adicional; es decir, se usará algún equipo compactador mecánico y agua con enzimas. Con este método se trata de reducir el tiempo de compactación.

Para que se realice un buen trabajo de compactación, se deben de tomar en cuenta las condiciones en que se encuentra el suelo natural. Por lo que se debe de realizar un trabajo minucioso de exploración y muestreo, en el lugar donde se va a realizar la compactación y en particular en los bancos de donde se extraerán los materiales para colocarlos en la obra y compactarlos. Por lo que las muestras deben de obtenerse lo más representativas y completas, a fin de que se realice en ellas las investigaciones de laboratorio correspondientes.

Para la elección del equipo de compactación, se debe de tomar en cuenta además de las características del suelo, las condiciones estructurales que se desean obtener del suelo, de acuerdo a las condiciones de la obra que se va a realizar y de las zonas (lugares) donde se va a efectuar la compactación.

Para elegir un equipo apropiado de compactación en un caso dado se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- a) Tipo de suelo
- b) Variaciones del suelo dentro de la obra
- c) Tamaño e importancia de la obra que se vaya a realizar
- d) Especificaciones de compactación fijadas en el proyecto
- e) Tiempo disponible para ejecutar la obra
- f) Equipo que se tenga antes de efectuar la obra.

A la diferencia que existe entre el peso volumétrico seco máximo que se obtiene en el laboratorio para realizar una compactación de campo y el peso volumétrico seco que se obtiene de dicha compactación se mide a través del concepto "Grado de Compactación".

Se define como grado de compactación de un suelo compactado en la obra a la relación en porcentaje, entre el peso volumétrico seco obtenido por el equipo en el campo y el peso volumétrico seco máximo correspondiente a la prueba de laboratorio que fundamenta el estudio.

El grado de compactación de un suelo se obtiene con la siguiente relación.

$$G_c(\%) = 100 \frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}} \quad (1)$$

γ_d — Peso volumétrico seco del suelo obtenido en el campo por un proceso de compactación mecánico.

γ_{dmax} — Peso volumétrico seco máximo obtenido en el laboratorio para tomarlo como base de una compactación de campo.

El concepto de grado de compactación, es muy empleado para dar resultados de compactación de campo, pero también tiene defectos y casi se podría decir que es inadecuado para evaluar la compactación lograda por un equipo de campo. Por ejemplo tenemos: Un material "A" en estado totalmente suelto, tal como se deposita en la obra, puede tener un grado de compactación del orden del 80%, antes de hacer en el alguna compactación, según la fórmula (1); otro material B en las mismas condiciones puede tener un grado de compactación de 60%. Si este material se compacta hasta obtener el mismo 80% de "A", se diría que ambos materiales están en las mismas condiciones de compactación, si es que se aplica el criterio de grado de compactación, pero la realidad es distinta, pues el material "A" está en estado suelto, en lo que se refiere a su comportamiento mecánico, en tanto que el material "B" ya ha sido parcialmente compactado

con lo que aumentó su resistencia, disminuyó su comprensibilidad y, en general adquirió características diferentes a las del estado suelto.

Algunos laboratorios, tomando en cuenta lo anterior, han adoptado -- una relación diferente para medir la compactación que alcanza el suelo en el campo, esta se llama "Compactación relativa" y esta definida por la siguiente expresión.

$$\text{C.R. (Z)} = 100 \frac{V_d \quad V_{d\text{máx}}}{V_{d\text{mín}} \quad V_{d\text{seco}}}$$

$V_{d\text{máx}}$ — Es el máximo peso volumétrico obtenido en la prueba de laboratorio que se utilice

$V_{d\text{mín}}$ — Es el mínimo peso volumétrico del mismo material

V_d — Es el peso volumétrico seco del material.

Esta relación tiene la ventaja de no caer en la ambigüedad del grado de compactación, ya que si se tiene un material suelto, su compactación relativa será de 0 %, pero tiene el inconveniente de no haber un procedimiento estandar para determinar $V_{d\text{máx}}$.

Por lo que el concepto de grado de compactación es el método más usado para fijar la compactación que se logra en el campo. Así, por lo general se expresa: "Se compactara este material hasta el 95% de peso volumétrico seco máximo obtenido en tal prueba de laboratorio, como mínimo"

Las propiedades que se persigue mejorar en los suelos con los procesos de compactación son las siguientes:

1. Homogeneidad
2. Características favorables de permeabilidad
3. Baja compresibilidad para evitar el desarrollo de presiones de poro excesivas o deformaciones inaceptables. Este requisito cuando los terraplenes son altos.
4. Razonable resistencia al esfuerzo cortante
5. Permanencia de las propiedades mecánicas en condiciones de saturación.
6. Flexibilidad para soportar asentamientos diferenciales sin agrietamiento.

Rodillos compresores e líticos.

Rodillo compresor de llantas lisas:

- Rodillo compresor triciclo diesel
- Rodillo compresor triciclo a vapor
- Rodillo compresor tandem
- Rodillo compresor de tres ejes

Rodillo de pata de cabra:

- Rodillo de pata de cabra remolcado
- Rodillo de pata de cabra automotorizado
- Rodillo de rejilla remolcado
- Rodillo compresor triciclo a patin

Compactadores de neumáticos:

- Compactador de neumáticos remolcado con una sola fila de ruedas
- Compactador de neumáticos remolcado con doble fila de ruedas
- Compactador de neumáticos autopropulsado

Rodillos compresores vibrantes.

Rodillo compresor vibrante de llantas lisas:

- Rodillo vibrante de un solo rodillo con dirección manual
- Rodillo vibrante de un solo rodillo remolcado
- Rodillo vibrante de un solo rodillo autopropulsado de dirección manual
- Rodillo vibrante de un solo rodillo autopropulsado con rueda direccional
- Rodillo vibrante de dos rodillos de dirección manual
- Rodillo vibrante de dos rodillos con rueda direccional y asiento de conductor
- Rodillo triciclo con rueda delantera vibrante
- Rodillo vibrante tandem
- Rodillo vibrante de tres ejes

Rodillos vibrantes de pata de cabra o similares:

- Rodillo vibrante de pata de cabra remolcado
- Compactador de placas vibrantes
- Documentación sin completar

Clasificación de las máquinas de compactación Ref.8
Capt. 2

TABLA No. 1

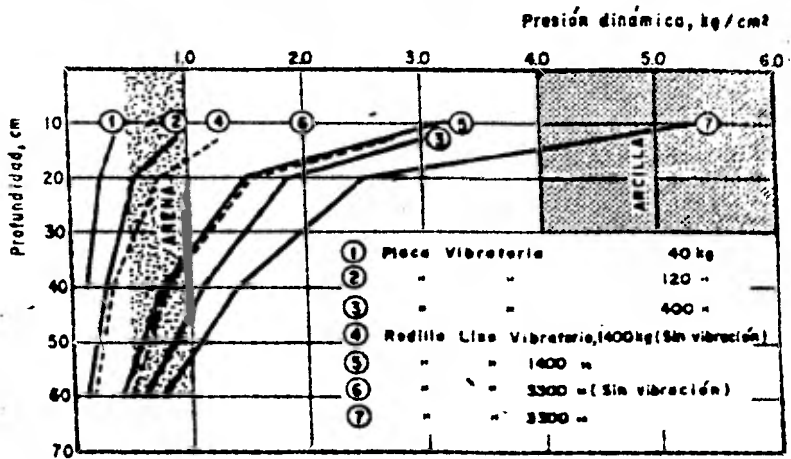
Características de utilización de los suelos, agrupados según sucs. Ref. 4 Cap. 4

Símbolo	Características de compactabilidad	Peso volumétrico seco máx. típico (Proctor estándar ton/m ³)	Compresibilidad y expansión	Permeabilidad y características de drenaje	Características como material de terraplén	Características como subrasante	Características como base	Características con pavimento provisional	
								c/revestimiento ligero	c/tratamiento asfáltico
GV	Buenas. Rodillos lisos vibratorios, rodillo neumático. Respuesta perceptible al bandedo con tractor.	1.9 a 2.1	Prácticamente nula	Permeable. Muy buenas	Muy estable	Excelente	Muy buena	Regular a mala	Excelente
GP	Buenas. Rodillos lisos vibratorios, rodillo neumático. Respuesta perceptible al bandedo con tractor.	1.8 a 2.0	Prácticamente nula	Permeable. Muy buenas	Estable	Buena a excelente	Regular	Pobre	Regular
GM	Buenas. Rodillos neumáticos o pata de cabra ligeros.	1.9 a 2.2	Ligera	Semipermeable. Drenaje pobre.	Estable	Buena a excelente	Regular a mala	Pobre	Regular a pobre
GC	Buenas o regulares. Rodillos neumáticos o pata de cabra.	1.8 a 2.1	Ligera	Impermeable. Mal drenaje	Estable	Buena	Regular a buena	Excelente	Excelente
SV	Buenas. Rodillos neumáticos o vibratorios.	1.7 a 2.0	Prácticamente nula	Permeable. Buen drenaje	Muy estable	Buena	Regular a mala	Regular a mala	Buena
SP	Buenas. Rodillos neumáticos o vibratorios.	1.6 a 1.9	Prácticamente nula	Permeable. Buen drenaje	Razonablemente estable en estado compacto.	Regular a buena	Mala	Mala	Regular a mala
SM	Buenas. Rodillos neumáticos o pata de cabra.	1.7 a 2.0	Ligera	Impermeable. Mal drenaje.	Razonablemente estable en estado compacto	Regular a buena	Mala	Mala	Regular a mala
SC	Buenas o regulares. Rodillos neumáticos o pata de cabra.	1.6 a 2.0	Ligera a media	Impermeable. Mal drenaje	Razonablemente estable	Regular a buena	Regular a mala	Excelente	Excelente
ML	Buenas a malas. Rodillos neumáticos o pata de cabra.	1.5 a 1.9	Ligera a media	Impermeable. Mal drenaje	Mala estabilidad si no está muy compacto	Regular a mala	No debe usarse	Mala	Mala
CL	Regulares a buenas. Rodillos pata de cabra o neumáticos	1.5 a 1.9	Media	Impermeable. No drena	Buena	Regular a mala	No debe usarse	Mala	Mala
OL	Regulares a malas. Rodillos pata de cabra o neumáticos.	1.3 a 1.6	Media a alta	Impermeable. Mal drenaje	Inestable. Debe evitarse su uso	Mala	No debe usarse	No debe usarse	No debe usarse
MH	Regulares a malas. Rodillos pata de cabra o neumáticos.	1.1 a 1.6	Alta	Impermeable. Mal drenaje	Inestable. Debe evitarse su uso	Mala	No debe usarse	Muy mala	Muy mala
CH	Regulares a malas. Rodillos pata de cabra.	1.3 a 1.7	Muy alta	Impermeable. No drena	Regular. Vigilar la expansión	Mala o muy mala	No debe usarse	Muy mala	No debe usarse
OH	Regulares a malas. Rodillos pata de cabra.	1.0 a 1.6	Alta	Impermeable. No drena	Inestable. Debe evitarse su uso	Muy mala	No debe usarse	No debe usarse	No debe usarse
Pt	No debe usarse	-	Muy alta	Regular o mal drenaje	No debe usarse	No debe usarse	No debe usarse	No debe usarse	No debe usarse

TABLA No. 2

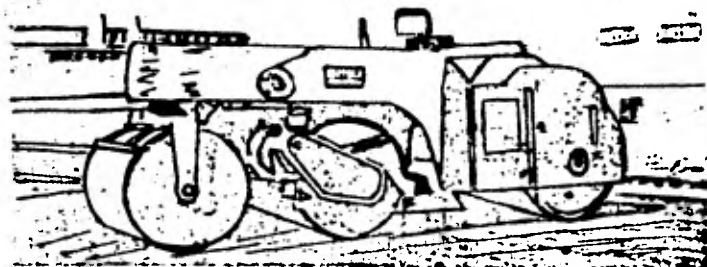
ADAPTACION DE LOS COMPACTADORES A LOS SUELOS A COMPACTAR. REF. 8 CAP. 4

Tipo de compactador	Tipo de suelo	Suelos finos			Arenas			Gravas			Gravas y arenas tratadas		Aglomerados			Tratamientos superficiales	
		Limos	Arcillas	Suelo de creta	Arenas limosas o arcillosas	Arenas limpias mal graduadas	Arenas limpias bien graduadas	Gravas plásticas	Grava mal graduada	Grava bien graduada	Grava con elementos muy gruesos	Con cemento	Con escoria	Aglomerado frío grava-betún	Aglomerado caliente abierto		Aglomerado caliente cerrado
Rodillo de llanta lisa		A emplear en el alisado diario tanto en el préstamo como en el terraplén.				Ineficaz.		Poco eficaz, a emplear solo en espesores pequeños (< 10 cm).	Relativa mente eficaz en grava gruesa; no emplear en curva con bolsa de arena.		Ineficaz.	Estos materiales son compactados por la combinación de un rodillo vibrante pesado doble (dos a cuatro pasadas y algo de precompactación) y de un compactador de neumáticos pesado (unas diez pasadas) que llegue hasta 5t de carga por rueda y de 7 a 10 bars de presión de inflado.		Poco eficaz.	Material a compactar por combinación de un rodillo de llanta lisa y de un compactador de neumáticos.	La compactación del aglomerado debe seguir reglas precisas: "neumáticos en cabeza", rodillo de llanta lisa detrás. Problemas de temperatura y de tipo siguiente: el empleo de gravillas.	Si bien se ha empleado los rodillos de llanta lisa de buena presión.
Rodillo de pata de cabra +		Bien adaptado a estos suelos.				Poco adaptado.		Utilizable si no tiene elementos gruesos.	Poco adaptado.		Ineficaz.	Inadapto; a proscribir.		Es menos indispensable que en el tipo siguiente.			A proscribir.
Rodillo de rejilla	Suelos cuyo empleo es desaconsejado o incluso proscrito.	Empleo poco recomendable.		Puede emplearse eventualmente pero la creta debe ser más tipo roca que tipo suelo.		Ineficaz.		Utilizable solo si no hay elementos gruesos o a romper.	Poco eficaz, a proscribir en curva; bolsa de arena puede utilizarse con curvas gruesas.		Muy indicado si el material es bastante blando.	Inadapto; a proscribir.			rodillo de neumáticos en cabeza. Empleo de vibrantes sobre los neumáticos, pero no usado en Francia.		A proscribir.
Rodillo de neumáticos +	En ciertos casos especiales, no obstante se podrán utilizar las máquinas en frente de las cuales hay una cruz	Bien adaptado a estos suelos, puede presentar problemas de movimiento sobre el material (traficability).			Problemas más o menos similares a los de los suelos finos correspondientes	Plantea problemas de movimiento (traficability).		Bien adaptado a estos suelos (peso medio, capa 20 cm).	Bien adaptado.		Debe ser muy pesado y aun así es poco eficaz.	Muy apto: carga por rueda proporcional al espesor.					Es la única máquina adecuada para este trabajo.
Cilindros vibrantes		A emplear en el alisado diario tanto en el préstamo como en el terraplén.				Bastante bien adaptado o bien adaptado.		Bien adaptado sobre todo si la plasticidad es débil, espesor notable.	Riesgo de segregación.		Muy eficaz si es pesado.	Problema de humedad que debe estar comprendida entre la óptima Proctor modificado y -2.		Muy adaptado: es de esperar progresos en este campo.			A proscribir.
Placas vibrantes		Evitar su empleo.				Bastante bien adaptado.		Bastante bien adaptado o bien adaptado.	Riesgo de segregación.		Eficaz si es pesada.	Problema de humedad que debe estar comprendida entre la óptima Proctor modificado y -2.		Puede convenir.			A proscribir.
Compresores por percusión		Evitar su empleo.				Ineficaz.		Bastante bien adaptado o bien adaptado.	Poco apropiado o no casos particulares.		Possible empleo de pistones.	A evitar.					A proscribir.
Observaciones especiales		Problemas de humedad		Plantea cuando la humedad es elevada, problemas específicos necesitándose capa de sandwich.		Suelos difíciles de compactar. Una humedad elevada facilita la compactación; suelos que se pueden compactar fácilmente.		Problemas de mala estabilidad por la humedad, crecimientos más peligrosos, no obstante, que con los suelos finos.	Problemas de mala estabilidad después de la compactación, crecimientos más peligrosos, no obstante, que con los suelos finos.		Plantear problemas especiales de fragmentación y de relleno, control deliendo mediante medida eléctrica de asentos.	Problemas de circulación de obra.	Estos materiales pueden presentar problemas de inestabilidad mecánica o por el exceso de huecos, como por ejemplo.	Estos materiales pueden presentar problemas de inestabilidad mecánica o por el exceso de huecos, como por ejemplo.	Fórmula de aglomerado de aglomerados para autoempleados por pistos y rebildado a evitar en fuertemente favor de los reterras im- a g l o m e r a d o s continuos.		

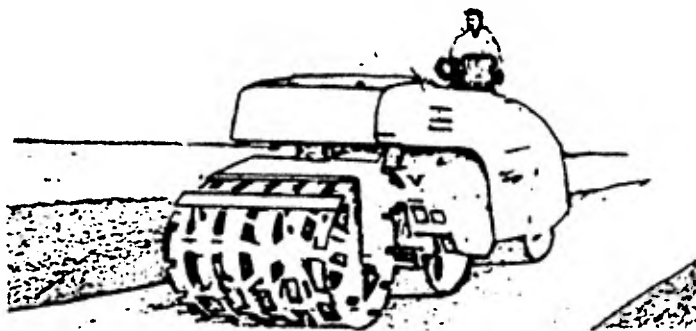


Presiones dinámicas ejercidas a diferentes profundidades por algunos equipos vibratorios.

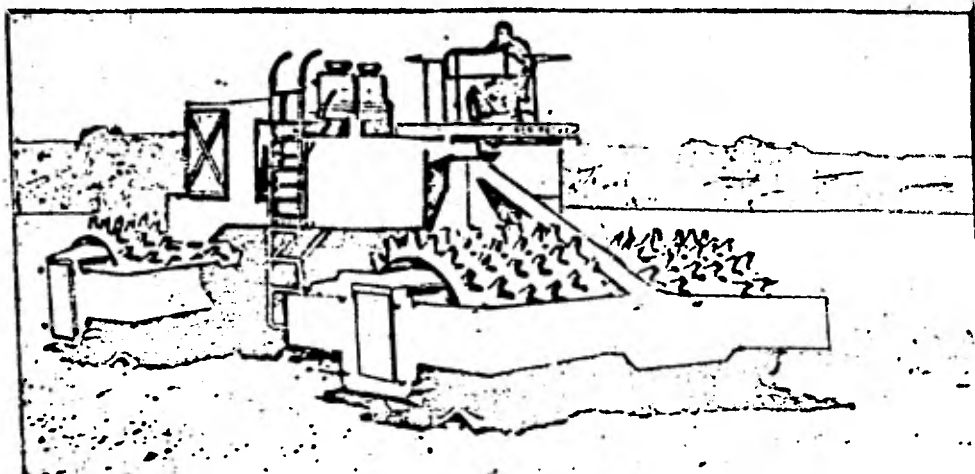
Ref. 4 Cap. 4



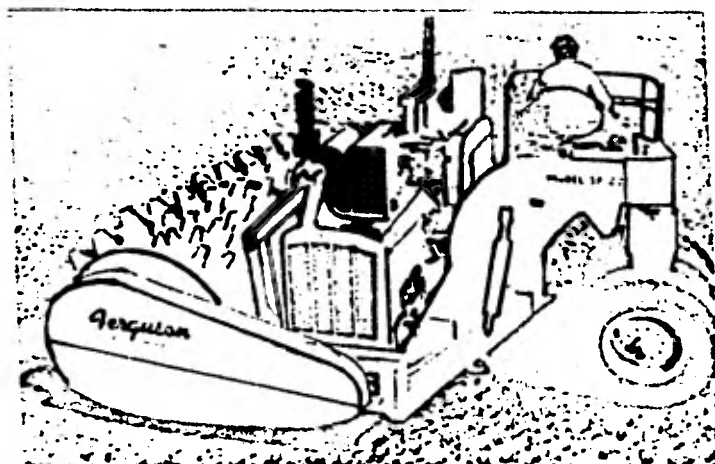
Compactador compuesto de 3 rodillos lisos, con el central vibratorio, el cual puede levantarse para convertir el equipo en un compactador convencional de 2 rodillos lisos en tandem. Ref. 4



Compactador compuesto de un rodillo segmentado al frente, un rodillo liso vibratorio y un rodillo liso atrás. Ref. 4



Rodillo pata de cabra superpandeo, de alta capacidad, con auto-propulsión, equipado con 4 tambores iguales, cuyos diámetros y anchos son de 152.4 cm. Está provisto de 120 patas tronco-cónicas por tambor, teniendo cada pata 23 cm de longitud y 61.4 cm² de área de contacto. Su velocidad de operación alcanza hasta 8 km/hora.



Rodillo pata de cabra auto-propulsado, provisto de un tambor doble de 152.4 cm de diámetro y 103 cm de ancho, con 144 patas tronco-piramidales por tambor. Cada pata tiene 23.5 cm de longitud, 68.1 cm² de área y ejerce una presión de contacto de 46.1 a 68.1 kg/cm², según que el tambor esté vacío o lastrado con agua. La velocidad de operación llega hasta 13.9 km/hora.

Capítulo 4.3 Pruebas de compactación en Laboratorio.

Las pruebas de compactación de suelos, sería ideal hacerlas en el campo en el lugar donde se va a realizar la compactación, para verificar las propiedades que se mejoran en el suelo al compactarlo. Pero un proceso de compactación de campo es muy lento y costoso, por el equipo que se usa para compactar y el espacio que se ocuparía para realizar la prueba. No sería conveniente estar reproduciendo compactaciones a voluntad cada vez, que se desee estudiar las propiedades particulares del material.

Por ésta razón, en el laboratorio de mecánica de suelos se han desarrollado diferentes pruebas de compactación, que reproducen en forma fácil y económica el problema de compactación de suelos, para así aplicarlo en los problemas de compactación de campo. Por esta razón, las pruebas de compactación de laboratorio, son la base del estudio para proyectos y fuentes de información para desarrollar un plan adecuado de trabajo de campo.

La información que da el laboratorio, respecto a un proceso de compactación, debe de ser la que represente la compactación que se va a realizar en un material en el campo. Esta información o datos se deben verificar, ya que se puede caer en un proceso de compactación dado por el laboratorio, que no represente realmente la compactación que se debe dar al material en el campo, esto puede acarrear consecuencias graves en cuanto a conclusiones prácticas que se adopten y, también se desviaría el criterio del Ingeniero Constructor, que juzga el resultado de laboratorio como una manera Única.

En la actualidad, las pruebas de compactación de suelos en el laboratorio son muy confiables y, sirven para determinar dos fases importantes de la compactación que son: a) la Representatividad b) el Control de calidad.

a) La representatividad de la prueba, es en el sentido de que se reproduzcan en el laboratorio un suelo con las mismas propiedades mecánicas que después se obtendrá al compactar el material en el campo. Se compacta el material en el laboratorio para obtener datos para proyectos de estructuras de tierra, y se obtiene información de resistencia, deformabilidad, permeabilidad, susceptibilidad al agrietamiento, etc., que se dará al constructor para que de la compactación que requiere el material en el campo.

b) El control de calidad de los trabajos de campo, la prueba de compactación de laboratorio, funciona como un índice comparativo del peso volumétrico de laboratorio y de campo, la similitud de las propiedades mecánicas entre ambos es mucho menos importante en este caso. Lo esencial de un índice de comparación de compactación es que sea siempre el mismo.

Existen diferentes formas de compactar el material en el campo, que es razonable pensar que no se logrará tener una prueba única, con una sola técnica estandarizada, que pueda representar a todos los suelos. Así es lógico pensar que hay varios tipos de pruebas de compactación.

La energía de compactación y los factores que influyen en la compactación de campo, influyen mucho en los procesos de compactación en laboratorio.

A partir de 1933, en que proctor desarrollo su prueba, la primera históricamente, han ido apareciendo otras, todas ellas se pueden agrupar en las siguientes:

- A: Pruebas Dinámicas
- B: Pruebas estáticas
- C: Pruebas por amasado
- D: Pruebas por vibración
- E: Pruebas especiales

A. Pruebas Dinámicas.

Las pruebas dinámicas, se basan en la compactación de los materiales por medio de impactos, el material se coloca dentro de un cilindro metálico y se golpea con un pistón desde una determinada altura. Hay diferentes tipos de pruebas dinámicas pero todas tienen las siguientes características comunes.

- a) La muestra se compacta por capas en el interior de un molde metálico cilíndrico, varía el tamaño del molde y el espesor de la capa, de una prueba a otra.
- b) Para compactar el material dentro del molde en todas las pruebas, se golpea a cada capa con un pistón, cuyo peso, dimensiones y altura de caída, cambia de una prueba a otra. El número de golpes que se aplica por capa también cambia en las diferentes pruebas.
- c) La energía específica que se desarrolla en todos los casos al compactar al suelo dentro del molde, se puede calcular con bastante aproxima-

ción con el empleo de la expresión $E_s = \frac{N_n}{V} W h$, quedando definida -
por el número de golpes por capa que da el pisón compactador, el número de capas en que el suelo se dispone dentro del molde, el peso del pisón compactador, la altura de caída del pisón y el volumen total del molde.

d) Para todas las pruebas se determina un tamaño máximo de partículas - que puede contener la muestra, y se eliminan los tamaños mayores por medio de cribado previo a la prueba, también se establece una especificación relativa al reuso del material durante la prueba.

Para poder hacer una buena representatividad en cada caso de las condiciones de compactación de campo, el valor de las variables puede hacerse cambiar según convenga, pero por lo general los laboratorios de mecánica de suelos, fijan una prueba patrón de acuerdo a su experiencia, -- que da resultados específicos para la compactación de los suelos en el campo.

A continuación se mencionan algunas de las pruebas dinámicas que han alcanzado mayor difusión:

Prueba proctor estándar (que originalmente propuso proctor)

Prueba proctor aasho estándar (con cuatro variantes)

Prueba proctor aasho modificada (con cuatro variantes)

Prueba E-10 de Us Bureau of reclamation

Prueba de impactos de california (en dos variantes)

Prueba británica estándar

Las características principales de algunas de estas pruebas se muestran en la tabla (3)

De las pruebas de compactación por impactos, se puede decir que no tiene una representatividad total, del comportamiento del suelo en el campo, esto se basa en las condiciones de confinamiento muy rígidas que se impone al suelo colocado en el interior del molde; esto limita la posibilidad de desplazamiento de las partículas del suelo, haciendo diferente el desplazamiento al que tiene en el campo, donde el confinamiento lateral es mucho menor. Con base a esto, Francis Hveen, propuesto realizar pruebas en moldes convencionales, con especímenes en forma de cilindro hueco, en cuyo interior se colocaría un cilindro de hule, que hiciera posible un desplazamiento de las partículas más parecido al que tienen en el campo.

Los resultados de una compactación por impactos, con el uso de dos arenas diferentes, se muestra en la figura (13)

Se usó la prueba británica estándar e ilustra el efecto del tipo del suelo.

Nótese la ventaja de la arena bien graduada, en que las partículas finas pueden acomodarse en los huecos entre las grandes.

Las partículas gruesas tienen gran influencia en el preparado de una muestra de suelo para compactación por impactos. Las investigaciones realizadas al respecto han encontrado, que en mezclas que contengan un 25% de cualquier agregado de un solo tamaño, hasta 2.5 cm. de diámetro, tiene poco efecto en la compactación del conjunto del suelo, pero porcentajes mayores de ese mismo tamaño hacen que decrezca con rapidez el peso volumétrico alcanzado, y cuando el porcentaje llega a ser de 70% el com-

portamiento del suelo es el de un conjunto de partículas gruesas de tamaño seleccionado.

En la fig. 14 se presentan curvas de compactación para ocho diferentes suelos, compactados con la prueba proctor aasho estándar, en esta figura se observa las curvas obtenidas de acuerdo a cada tipo de suelo y, en cuales la prueba por impactos es más eficiente.

En la fig. 15 se muestra la relación entre peso volumétrico seco y el contenido de agua de una arena arcillosa compactada con la prueba británica estándar de impactos. Al material después de haber sido compactado se seca y después se va humedeciendo, hasta formar la curva.

La forma de las curvas obtenidas en el proceso de compactación se considera "regular" cuando presenta el contorno en forma parabólica que se muestra en algunas figuras presentadas, pero en algunos suelos, como arenas uniformes y ciertas arcillas coloidales altamente plásticas exhiben con frecuencia curvas de compactación de forma muy irregular. La forma de la curva puede estar ligada a la energía específica de compactación; por ejemplo en las arcillas de alta plasticidad, la forma irregular que se obtiene en la prueba proctor aasho estándar, puede tornarse muy regular cuando se usa la prueba proctor (aasho) modificada.

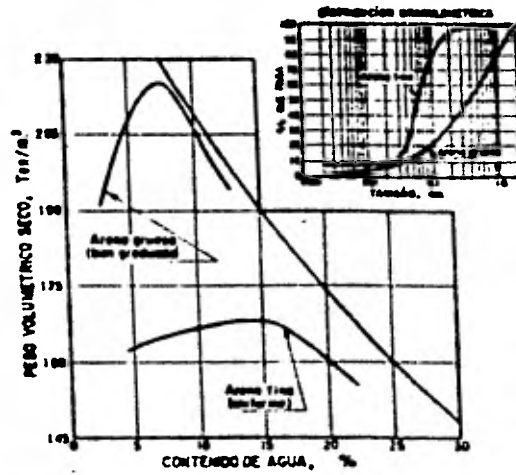


Fig 12
 Curvas de compactación para dos arenas de diferente granulometría con la misma energía de compactación. Ref. 4 Cap. 4

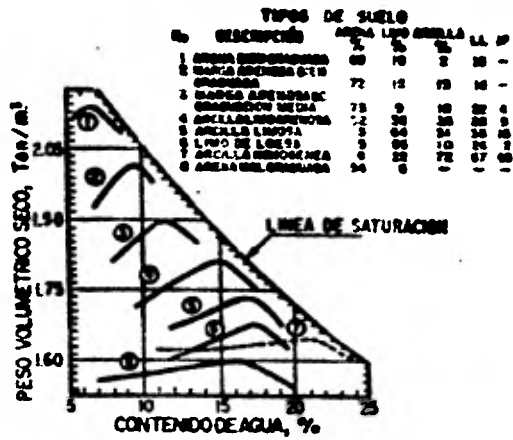


Figura 14 Curvas de compactación para 8 suelos utilizando la prueba Proctor (AASHO) estándar

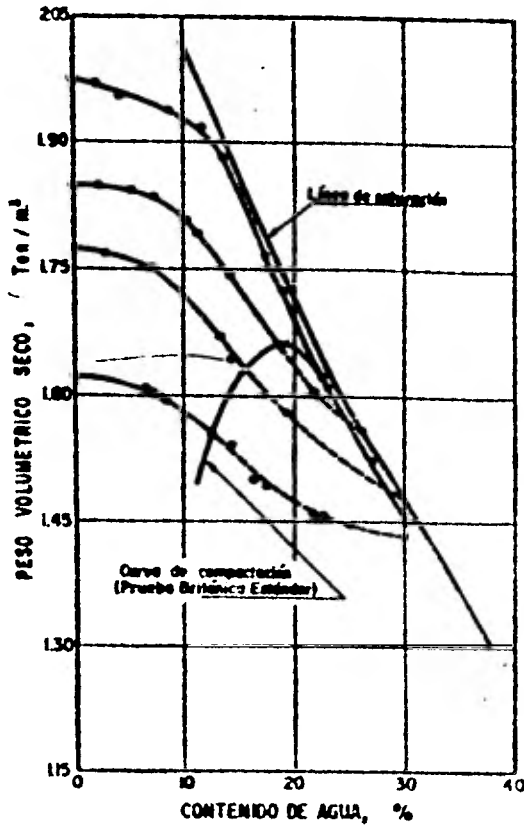
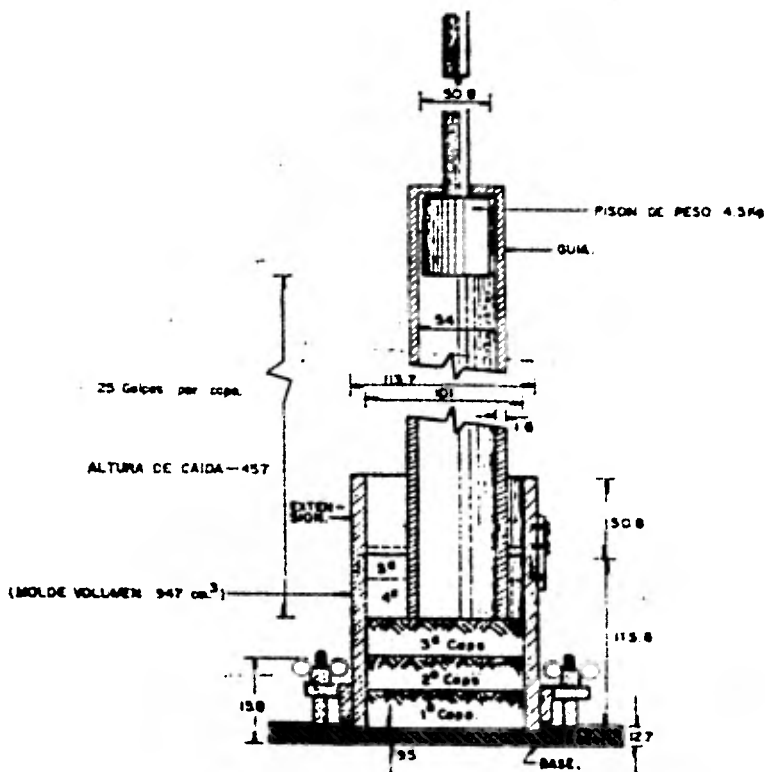
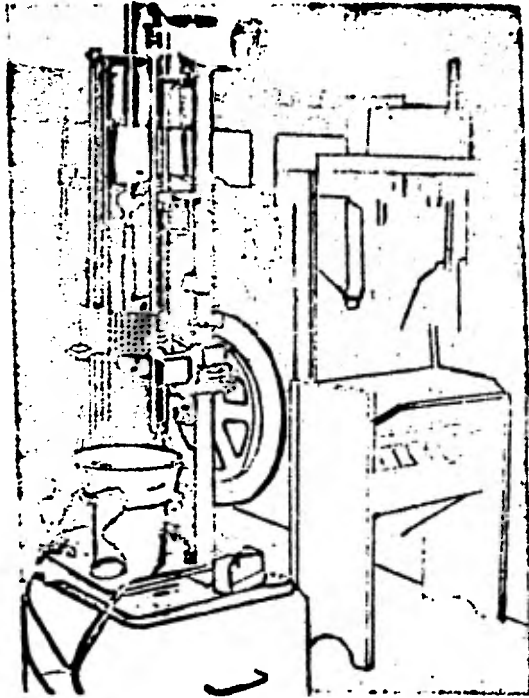


Figura 15 Relación entre el peso volumétrico seco y el contenido de agua en una arcilla arenosa cuando se humedece o seca lentamente después de ser compactada



DIMENSIONES EN MM.
 COMPACTACION POR IMPACTOS.
 (PROCTOR AASHO MODIFICADA).

Ref. 4 Cap. 4



Compactador mecánico por impactos, de Texas.

Compactador mecánico por impactos, de Texas Ref. 4 Cap.4

B. Pruebas Estáticas.

La Prueba Estática de compactación la introdujo O.S. Porter. En esta prueba se coloca al material dentro de un molde cilíndrico de 15.24 cm. de diámetro; el material se coloca en tres capas acomodando cada una con 25 golpes con una varilla con punta de bala, lo que no significa una compactación intensa, pues la varilla es ligera y la altura de cada, es la mínima utilizable por el operador para una manipulación cómoda. La compactación del material se logra al aplicar al conjunto de tres capas una presión de 140.6 Kg/cm², la que se mantiene durante un minuto.

Al aplicar esta prueba a suelos triccionantes la curva que se obtiene de $\gamma_s - \omega$ es la forma parabólica y no como en la prueba dinámica en la que no se presenta esta forma para estos suelos.

Por esta razón esta es una de las pruebas de laboratorio que se utilizan para la representatividad de suelos fricciones.

Al igual que en las pruebas dinámicas, se presentan dudas de la representatividad de la prueba estática, respecto a cualquier proceso de compactación en el campo, la aplicación de presión, que de por sí es un método eficiente para compactar suelos granulares, no considera ni la vibración ni ninguno de los métodos modernos de compactación de estos suelos en el campo; además la aplicación de la presión estática sobre el material, puede producir cambios granulométricos importantes durante la prueba.

La prueba estática es la que mejor representa el efecto de trabajo de -

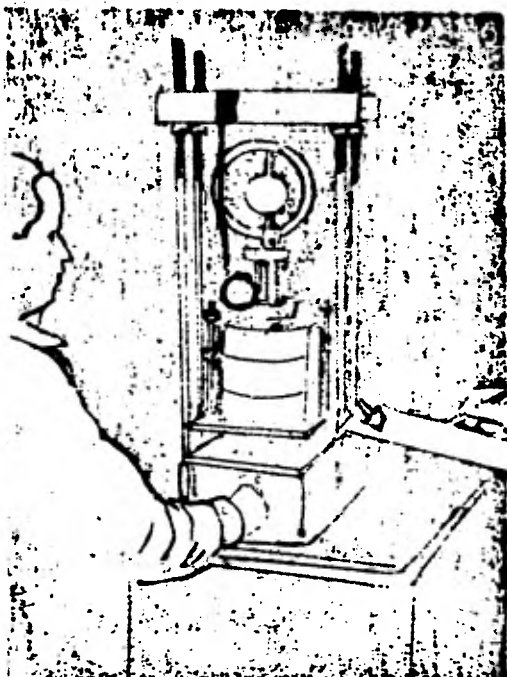
un rodillo liso sin vibración de aquí la idea de que las pruebas dinámicas representan mejor los procesos de compactación en arcillas, las estáticas son más apropiadas en arenas y gravas pero en la actualidad los suelos friccionantes se compactan con vibración.

C. Compactación por amasado

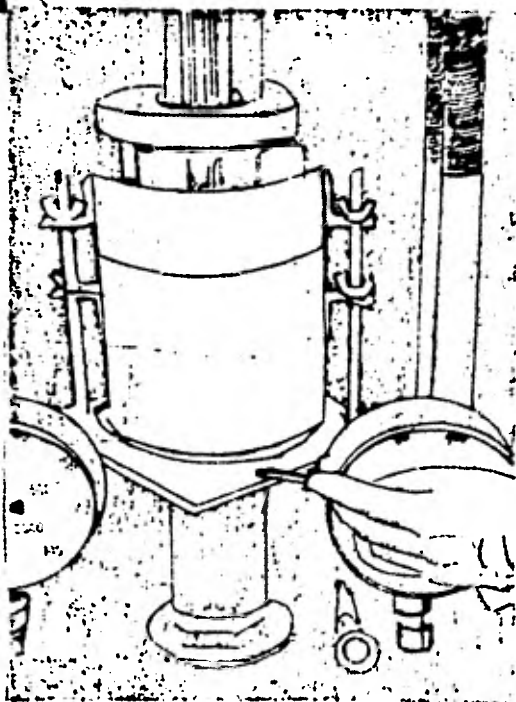
La compactación por amasado en el campo ya tiene bastante tiempo de estar utilizándose con equipos como el pata de cabra. En el laboratorio este método es relativamente nuevo, con excepción de la prueba que desarrolló S.O. Wilson en la universidad de Harvard (EE.UU) y que recibe el nombre de prueba "Miniatura" de Harvard.

En todos los casos las pruebas de compactación por amasado en el laboratorio, tienen por objeto reproducir el efecto que producen muchos rodillos de campo (por ejemplo rodillo pata de cabra, de almohadillas; neumáticos, etc), con el objeto de lograr en el espécimen la misma estructuración interna que adquiere el suelo en el campo.

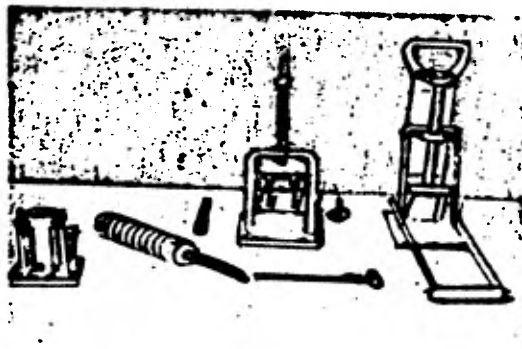
Hveem desarrolló un compactador mecánico de laboratorio, que forma especímenes por medio de un verdadero proceso de amasado, independientemente de la influencia del operador, aún no se tiene suficientes publicaciones sobre resultados y conclusiones, de este equipo, que permitan definir la representatividad que adquieren los materiales, pero de acuerdo a su funcionamiento se puede pensar que este método de compactación sea el que produzca muestras mas representativas de los suelos.



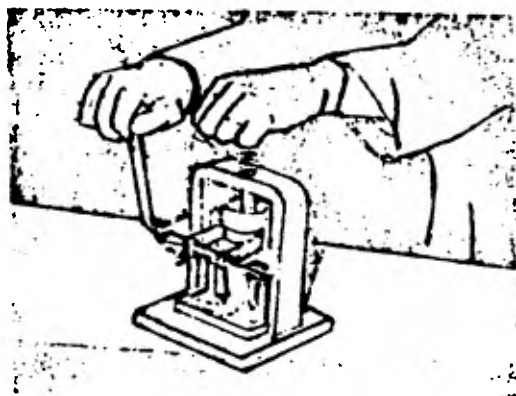
Compactación estática. Prensa y molde instalarlo en ella. Ref. 4 Cap. 4



Compactación estática. Se muestra la exudación del espécimen. Ref. 4 Cap. 4



Equipo para realizar la prueba miniatura de Harvard.



Prueba miniatura de Harvard. Afinamiento estático del espécimen preparado por amasado.

Ref. 4 Cap. 4

TABLA 3

Prueba	Tratamiento del material	Molde		Peso del martillo	Altura de caída	Nº de capas	Nº de golpes por capa	Reuso del suelo	Energía específica
		Diámetro	Altura						
		cm	cm	kg	cm	—	—	—	kg cm. cm ²
Proctor estándar	Cribado por la malla de 1/4"	10.16	12.70	2.490	30.48	3	25	si	4.02
Prueba E-10 del U.S.B.K.	Cribado por la malla Núm. 4, tras secado al aire y desintegración de grumos	10.30	15.24	2.490	35.72	3	15	si	6.05
Proctor (AASHO) estándar (variante A)	Cribado por la malla Núm. 4, tras secado al aire	10.16	11.43	2.490	30.48	3	25	si	6.05
Proctor (AASHO) modificada (variante D)	Tras secar al aire, se desintegran grumos y se criba por la malla de 3/4", reemplazando material retenido con igual peso del material compactado entre las mallas de 3/4" y Núm. 4	15.24	17.78	4.530	45.72	5	55	no	27.51
California Variante A	Cribado por la malla de 3/4" en estado seco	7.30	91.44	4.530	45.72	5	20	no	17.70
Variante B	Cribado por la malla de 3/4" en estado húmedo	7.30	91.44	4.530	45.72	10	20	no	35.40
Proctor estándar	Secado en horno o al aire y cribado p/malla 3/16"	10.16	11.68	2.492	30.48	3	25	si	6.05
Variante Proctor de SOP	Secado al aire y cribado por la malla Núm. 4	10.16	11.68	2.490	30.48	3	30	si	6.65

Características de las pruebas de compactación por impactos de uso más generalizado. Ref. 4 Cap. 4

TABLA No. 4

Tipo de prueba	Tipo de Suelo				Mezcla de arena, grava y arcilla	
	Arcilla arenosa		Arena		P.F.S. máx. T/M3	Humedad óptima %
	P.F.S. máx. T/M3	Humedad óptima %	P.F.S. máx. T/M3	Humedad óptima %		
Británica estándar	1.850	13	1.940	11	2.060	9
Proctor (AASHTO) modificada	2.050	11	2.080	9	2.220	7
Rodillo liso de 5 ton	1.830	16	2.060	10	2.150	8
Rodillo liso de 7.5 ton	1.890	14	2.120	8	2.210	7
Rodillo neumático	1.780	19	2.010	11	2.020	7
Rodillo pata de cabra (vástago b de Fig. IV-4)	1.910	12	—	—	2.080	6
Rodillo pata de cabra (vástago a de Fig. IV-4)	1.920	12	—	—	2.060	5
Plataforma vibratoria manual de 450 kg	1.860	13	2.060	10	2.180	7

Comparación de pesos volumétricos máximos y humedades óptimas obtenidas con distintas pruebas de laboratorio y varios equipos de campo. Ref. 4

TABLE No. 5

Suelos	Descripción	Clasificación (S.U.C.S.)	Límites de plasticidad		Porcentaje que pasa la malla			
			L.L.	P.	3/4"	Nº 4	Nº 10	Nº 200
1	Arena fina uniforme	SP	22	INAP.	100	100	100	5
2	Arena media limosa, bien graduada	SW-SM	25	INAP.	100	100	10	10
3	Arena gruesa, angulosa	SW-SM	29	INAP.	100	100	30	12
4	Arena limo-arcillosa	SM-SC	21	7	100	100	15	25
5	Arcilla lisa	CL-ML	34	12	100	100	70	45
6	Arcilla de alta plasticidad	CH	62	38	100	100	101	90
7	Arcilla de alta plasticidad	CH	71	35	100	100	105	92
8	Grava angulosa con 9% de finos no plásticos	GW-GM	21	6	100	49	21	9
9	Grava redondeada con 9% de finos no plásticos	GW-GM	21	6	100	47	21	9
10	Grava angulosa con 10% de finos no plásticos	GM	21	6	100	55	25	18
11	Grava redondeada con 10% de finos no plásticos	GM	21	6	100	55	25	18
12	Grava angulosa con 9% de finos plásticos	GW-GC	49	29	100	42	19	9
13	Grava redondeada con 9% de finos plásticos	GW-GC	49	29	100	42	19	9
14	Grava angulosa con 18% de finos plásticos	GC	49	29	100	54	28	14
15	Grava redondeada con 18% de finos plásticos	GC	49	29	100	54	28	14
16	Arena arcillosa con 30% espec. de gravas	SC	38	12	100	72	35	37
17	Arcilla arcillosa	SC	38	12	100	100	80	45

Comparación de resultados entre las pruebas estática y dinámica.

Relación de suelos estudiados Ref. 4

TABLA No. 6

Comparación de resultados entre las pruebas estática y dinámicas. Resumen de pesos volumétricos secos máximos y humedades óptimas. Arenas y suelo finos. Ref. 4

Suelo	E-2		E-4		P		M-2		M-4	
	γ_d	w	γ_d	w	γ_d	w	γ_d	w	γ_d	w
1. SP	1555	17.1	1556	17.0	1645	16.8	1630	15.3	1610	15.4
2. SW-NM	1640	16.8	1645	15.0	1720	14.0	1730	15.5	1705	12.2
3. SW-NM	1785	14.7	1792	14.3	1800	12.3	1910	12.2	1900	12.0
4. SM-SC	1830	14.0	1850	13.7	1900	11.5	1912	12.0	1910	11.6
5. CL-ML	1558	22.0	1610	19.8	1745	15.3	1675	17.3	1740	16.7
6. CH	1512	31.8	1800	30.4	1715	10.9	1510	25.4	1540	21.6
7. CH	1290	32.2	1300	32.4	1630	21.8	1450	20.1	1515	23.9

Gravas

	E-4		E-6		P		M-4		M-6	
	γ_d	w	γ_d	w	γ_d	w	γ_d	w	γ_d	w
8. GW-GM	2124	9.5	2117	9.5	2095	7.5	2213	7.6	2175	7.0
9. GW-GM	2049	8.8	2062	9.1	2032	8.1	2120	7.7	2095	8.0
10. GM	2045	10.1	2050	9.1	2050	9.9	2104	8.5	2097	8.6
11. GM	2015	10.0	1991	10.0	2012	10.9	2077	9.0	2037	9.2
12. GW-GC	1971	11.0	1980	10.9	2077	10.6	2112	8.7	2107	8.4
13. GW-GC	1951	11.5	1962	10.2	2021	10.7	2059	8.3	2037	8.5
14. GC	1892	12.6	1916	12.6	2008	10.4	2077	9.3	2072	8.5
15. GC	1825	11.0	1807	11.6	2052	10.1	2020	9.0	2014	8.5
16. SC	1514	22.9	—	—	1628	21.4	1622	12.4	—	—
17. SC	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Símbolos: E-2 Proctor (AASHO) estándar, en molde de 2" (miniatura)
 E-4 Proctor (AASHO) estándar, en molde de 4"
 E-6 Proctor (AASHO) estándar, en molde de 6"
 M-2 Proctor (AASHO) modificada en molde de 2"
 M-4 Proctor (AASHO) modificada en molde de 4"
 M-6 Proctor (AASHO) modificada en molde de 6"
 P Prueba estática (Porter SOP) 6"

Nota: Los valores situados en las columnas correspondientes a pesos volumétricos máximos (γ_d) y humedad óptima (w) representan el promedio de 3 ensayos.
 Los valores de γ_d están en kg/m³ y los de w, en porcentaje.

D. Compactación por vibración

Las pruebas de vibración en el laboratorio se han desarrollado bastante en los últimos años, ya que en los equipos de campo la vibración se utiliza en la compactación de la mayoría de los suelos.

Estas pruebas se desarrollan en diferentes formas y métodos de acuerdo a la representatividad que se busque, muchas utilizan un molde proctor montado en una mesa vibratoria; en el desarrollo de una prueba por vibración se estudia el efecto de frecuencia, la amplitud, la aceleración de la base vibratoria, así como la influencia de sobrecargas, de la granulometría y el contenido de agua.

Las investigaciones en el laboratorio han encontrado que con aceleraciones entre, 1g y 2g (g= gravedad) se obtienen los máximos pesos volumétricos en las arenas, y que al aumentar la presión sobre éstas, se requiere de una aceleración mayor para alcanzar un cierto peso volumétrico. También se ha observado que con aceleraciones mayores a 2g, el peso volumétrico disminuye otra vez por efecto de la sobrecompactación.

Para arenas saturadas o húmedas, el peso volumétrico sigue aumentando con aceleraciones superiores a 3g.

La técnica sueca ha desarrollado una prueba de laboratorio con vibración, que consiste en colocar el espécimen en la parte baja de un cilindro unido a un bloque masivo de concreto; sobre el espécimen y cubriéndolo en toda su superficie vibra una placa, provista de un vástago sobre el que -- actúa el vibrador.

Se ha estudiado también en el laboratorio que, un incremento en la amplitud, incrementa la eficiencia de la vibración y su efecto en profundidad a todas las frecuencias, al aumentar la deformación de todas las partículas del suelo, una amplitud grande es especialmente favorable en las arcillas y en materiales granulares gruesos.

Cuando se utilizan amplitudes muy grandes pueden reducirse las frecuencias de los equipos, lo que conduce a procesos de compactación más económicos.

La investigación de laboratorio, ha hecho ver también que la utilización de la frecuencia de resonancia para el sistema suelo-vibrador, es útil cuanto mayor sea la presión que se aplica al suelo compactado, en la práctica la compactación en el campo, ha conducido a la utilización de frecuencias más altas en los equipos de compactación más ligeros.

Se presenta a continuación una tabla de los modos de vibrar de algunos suelos, para tener una idea de la vibración que se debe dar a estos materiales para compactación.

**FRECUENCIAS NATURALES DEL CONJUNTO SUELO-VIERRADOR
PARA VARIOS SUELOS Y ROCAS**

TIPO DE SUELO O ROCA	FRECUENCIA NATURAL r.p.m.
2 m. de turba sobre arena	750
2 m. de rellenos con arenas y suelos finos	1145
Arena y grava con lentes de arcilla	1165
Terracería compactada por el peso del tránsito	1280
Arcilla húmeda	1430
Arena media muy uniforme	1445
Arena gruesa uniforme	1570
Arcilla casi seca	1650
Caliza	1800
Arenisca	2040

E. Pruebas Especiales

En estas pruebas se ha desarrollado la máquina de compactación giratoria, que reproduce en el espécimen de laboratorio la estructura y las características que ha adquirido el suelo cuando se ha compactado el suelo en el campo, con los equipos usuales sobre todo rodillos. Se puede considerar a esta máquina como un compactador por amasado, en la fig. (10) se muestra el dispositivo por el cual se trasmite el espécimen una presión combinada con efecto de balanceo.

Las pruebas que se han hecho con este aparato están ligadas a la tecnología de los pavimentos, y se han empezado a desarrollar diferentes modos

e intensidades de aplicación de la energía de compactación para distinguir los volúmenes de tránsito. La máquina también ha demostrado la influencia que tiene la plasticidad de la fracción fina de los suelos que se prueban y para estudiar la degradación estructural de los materiales bajo un cierto tipo de carga dinámica.

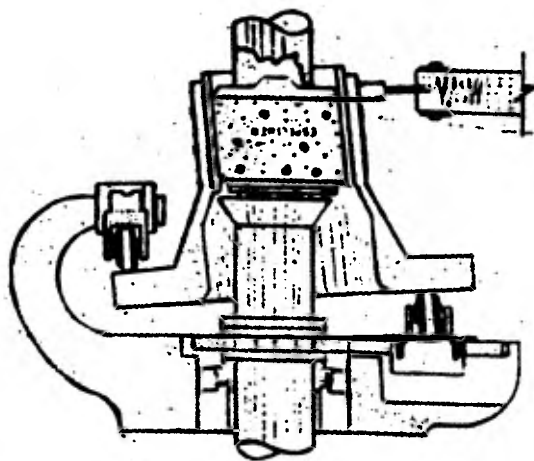


Fig. 10 Dispositivo esquemático de la máquina de Compactación giratoria Ref. 4

4.4. COMPACTACION DE SUELOS GRANULARES.

La compactación de los suelos granulares presenta problemas muy variados y en ellos se puede decir, que se presentan todos los problemas de compactación que hay, excluyendo a los pedraplenes y a los materiales granulares tratados (gravas tratadas con cemento o escoria),

Los suelos granulares plásticos (SC, GC, SM, GM), presentan más o menos los mismos problemas de compactación que los suelos finos.

Los materiales limpios mal graduados (GP, SP) presentan problemas al compactarlos.

Los materiales limpios bien graduados (GW, SW) son fáciles de compactar después de haber establecido el espesor de la capa por compactar.

Las características de los materiales granulares que se deben de tomar en cuenta para compactarlos son:

a) La forma angulosa que presentan los suelos granulares, es de gran importancia durante el desarrollo de la compactación, y en mantener mejor estabilidad el material después de la compactación.

b) Los suelos granulares son campos de aplicación de los equipos con vibración.

- Compactación de arenas limosas y arcillosas.

Las arenas con alto contenido de limo casi no se distinguen de los limos con mucha arena. El comportamiento que presentan estos materiales es muy parecido.

Los materiales granulares contaminados pueden presentar exactamente los mismos problemas que los limos y las arcillas, y por su característica

se aproximan más a éstos y para compactarlos se tratan como arcillas o limos con arena, a medida que disminuye la fracción fina, se va disminuyendo la dificultad debida a la humedad.

- Arenas limpias mal graduadas.

Se trata de arenas en que predomina un solo tamaño, su compactación es difícil y la estabilidad que presentan después de la compactación, es baja lo que implica que tienda a descompactarse fácilmente.

En general, estas arenas son permeables y la humedad no les afecta, si son arenas finas (granos del orden de 1/2 mm. o más finos) desarrollan capilaridad y la humedad que adquiere el material le da una ligera cohesión que favorece la compactación y la estabilidad del material.

En estas arenas lo más general es que las curvas proctor obtenidas no presenten un máximo que este claro y que termine la curva de compactación sin caída hacia la línea de saturación.

La estabilidad de estas arenas está influenciada por la forma angulosa de las partículas. Tiene muy poca estabilidad ya que la homogeneidad de las partículas disminuye el peso específico obtenido y que este origina un aumento del ángulo de fricción interna.

Si los granos son redondos, el ángulo de fricción interna es muy pequeño y el material es inestable, la superficie de estos materiales es muy difícil de compactar.

Tienen mejor estabilidad las arenas que tienen diferentes formas en sus granos y si se eleva su angularidad, la compactación de una arena triturada se conserva mejor que la de una arena de duna o de playa.

Los equipos que se pueden utilizar para la compactación de estas -- arenas son los rodillos de neumáticos y los rodillos lisos vibratorios. Los rodillos de neumáticos pueden ser eficaces, pero cuando la estabilidad de la arena es baja, ocurre que la máquina destruye el trabajo que acaba de realizar, y el material presenta problemas para el rodamiento -- de este equipo.

Los equipos vibratorios se pueden aplicar a estos materiales como lo más eficiente en compactación. Los rodillos lisos vibratorios reuelven el problema del rodado de la máquina, realizando una pasada sin vibrar para lograr una precompactación en el material,

Por la falta de estabilidad de estas arenas, se ha recurrido en la técnica de la compactación a otro material para lograr la compactación, por lo general se cubre la arena con una grava bien graduada, el espesor de esta capa no debe de ser muy grande, ya que el efecto de compactación no se dejaría sentir en la arena situada debajo. Por lo general es conve-niente un espesor de unos 10 cms.

Para realizar esta compactación, se puede emplear un compactador de neumáticos con ruedas cargadas con mucho peso, utilizar un rodillo lino vibrante pesado.

- Arena limpia bien graduada.

Los problemas que se presentan en las arenas limpias mal graduadas disminuyen o desaparecen por completo en estas arenas.

Estas arenas por tener gran variedad de tamaños se pueden compactar con casi todos los tipos de compactadores, de acuerdo a las propiedades

de las máquinas y los espesores a compactar.

Los rodillos lisos se ocupan para compactar capas muy finas de sólo algunos centímetros de espesor.

Los rodillos pata de cabra, se pueden utilizar si el material no es completamente limpio y si es intermedio entre una arena limpia bien graduada y una arena limosa o arcillosa.

Los compactadores de neumáticos son muy eficientes y pueden tener una eficiencia apreciable en profundidad si están suficientemente lastrados. Los equipos vibratorios son quizá los que mejor se adaptan a estos suelos.

Entre más limpias sean estas arenas presentan menos problemas de humedad, pero si aumenta su contaminación y en particular si son de tipo mixto, deberá vigilarse mucho la humedad del material.

- Gravas plásticas (GM o GC)

Estos materiales, se encuentran en grandes cantidades en las terrazas antiguas de los valles.

En la técnica de caminos son muy apreciables estos materiales, se utilizan como sustitución en bases de limos y arcillas cuando la humedad de compactación de éstos es mala y no se pueden compactar, lo que obliga a desechar estos materiales.

En caminos estos materiales se emplean como terraplen, porque ellos casi no presentan problemas para su compactación.

Si el contenido de finos es elevado y el material granular tiene poca angulosidad, se pueden presentar algunos problemas para su compactación. En algunos casos se puede aplicar más o menos las consideraciones de compactación que se aplica a los suelos finos.

Cuando en estas gravas se tiene problemas con la humedad de compactación, las condiciones climatológicas son malas, y los plazos para trabajar impiden esperar a que sequen, se puede tratar a la grava con cemento y cal, facilitándose la compactación.

Cuando este material es extraído por dragado bajo el agua se debe aprovechar esta circunstancia para eliminar lo más que se pueda los materiales plásticos finos.

Los equipos que se emplean para compactar las gravas con finos plásticos que tengan una humedad aceptable de compactación son:

Compactadores de neumáticos

Compactadores con vibración pesados.

- a) Los compactadores de neumáticos y en especial los remolcados con peso totales mayores de 15 T. son convenientes para compactar capas de 20 cm. de espesor.
- b) Los equipos con vibración pesados son muy eficientes y permiten capas de 50 cm. de espesor o más cuando el material tiene alto contenido de finos, se eleva la plasticidad y el material se vuelve cohesivo, y por lo tanto, los rodillos linos

gregación vertical que aumenta del defecto granulométrico de la grava mal graduada.

El efecto de la vibración en una grava de granulometría gruesa, provoca un movimiento de partículas tal que, las grandes se bloquean entre ellas y los elementos finos decienden por gravedad.

El aplicar la vibración a un material que contenga mucha arena, provoca que el material sea fluido y las partículas gruesas deciendan por gravedad y por diferencia; lo que hace que en la superficie del material quede más arena que grava.

- b) El equipo que da mejor resultado en estos materiales es el de neumáticos en el que se regula el peso y la presión de las llantas para mejorar la estabilidad del material.

Por lo general se tendrá que tratar la superficie, añadiendo arena o, por lo contrario gruesos según la grava que se esté compactando.

- c) Los rodillos lisos se pueden utilizar para compactar capas delgadas, de grava mal graduada gruesa. Pero en definitiva para gravas arenosas, estos rodillos no se usan.

- d) Los rodillos pata de cabra no se utilizan en estos materiales.

Un caso particular que se presenta frecuentemente en estos suelos, es el de gravas mal graduadas gruesas y de partículas redondeadas. Estos

vibrantes y sin vibrar son menos convenientes para realizar la compactación.

En un caso especial, cuando la grava contiene una gran cantidad de finos plásticos, se usa para la compactación el rodillo pata de cabra en forma muy eficiente.

Los rodillos lisos son poco eficientes sobre todo si la grava contiene una gran cantidad de finos plásticos. Las capas que se compactan deben de tener un espesor máximo de 10 cm. incluso para los equipos pesados.

- Gravas mal graduadas.

Estos suelos presentan dos efectos opuestos, cuando el material contiene muy poca arena o cuando la grava es arenosa.

Quando la grava tiene poca arena se dice que la granulometría es gruesa y cuando es arenosa se dice que tiene una bolsa de arena, la curva granulométrica de esta grava presenta una joroba.

Este material tiene poca estabilidad, aún después de haber sido compactado, debido a la falta de variedad de campos en los granos que componen el material. Si se utiliza este material en la base de una carretera conduce a superficies deformables.

Los equipos y formas de compactar estas gravas son:

a) Rodillos lisos vibrantes. con estos equipos se produce una ne-

La grava tratada con escoria, no presenta grandes problemas con la humedad de compactación. Este material se puede compactar sin ningún inconveniente con mal tiempo, además, no hay ningún plazo impuesto para realizar la compactación después de haber hecho la mezcla de grava y escoria.

En el caso de la grava tratada con cemento, el material se debe de compactar con una humedad muy precisa. La compactación debe realizarse en un período máximo de 5 horas después de haber efectuado la mezcla.

La humedad óptima de compactación de campo de la grava-cemento debe ser igual a la óptima proctor modificada de la grava natural (sin cemento), disminuida en un punto.

En los resultados de compactación de campo de la grava-cemento se puede exigir que los valores del peso volumétrico seco sean iguales al 100% del obtenido en la prueba proctor modificada con 95% de los valores obtenidos por encima de 97 ó 98% del peso específico seco de referencia.

Para las gravas con escoria, se obtienen mejores resultados y se puede exigir por ejemplo, que el 95% de los valores obtenidos sobre pasen el peso específico seco obtenido en la prueba proctor modificada.

- Materiales con elementos muy gruesos

Son materiales de rova que están formados por elementos muy gruesos que tienen medidas de 50 cm. o más pero que también pueden contener elementos muy finos.

materiales se obtienen por dragado y no son tratados (limpiarlas por lavado). Por lo general no tienen humo material fino (plásticos) y el contenido de arena fina es poco. El redondeado de sus partículas hace que su compactación sea difícil.

A estos materiales si se les compacta, presentan una mejoría muy baja, el material sigue siendo inestable y su resistencia a los esfuerzos cortante y tangencial es baja.

Este material se puede mejorar por medio de la trituración de los granos redondeados, aumentando la angulosidad y el contenido de finos, mejorando así la granulometría del material.

Este material ya mejorado se puede utilizar en un terraplén compactándolo con una máquina de neumáticos con mucho peso y con poca presión de inflado en las llantas, o también un equipo vibrante de mucho peso.

- Gravas bien graduadas

Estas gravas presentan pocos problemas en la compactación por la gran variedad de tamaños de las partículas del suelo.

Las gravas bien graduadas, que tienen un ángulo de fricción interna elevado, debido en general al porcentaje elevado de elementos triturados que aumentan la angulosidad en las partículas, hace que al compactar el suelo tenga una estabilidad excelente.

El equipo utilizado para la compactación de gravas bien graduadas es el combinando rodillos lisos vibratorios y compactadores de neumáticos,-

obteniendo muy buenos resultados.

Si el material tiene poca angulosidad, no es tan necesaria la intervención de equipos vibratorios. Es suficiente utilizar un equipo compactador de neumáticos pesado con gran presión de inflado en las llantas. - Los espesores que se pueden compactar serán de 20 a 30 cm.

- Gravas tratadas.

En la actualidad en la técnica de carreteras, se utiliza cada vez más gravas tratadas con cemento o esponja granular. Este material se usa en bases.

Para realizar la compactación de estas gravas se han tomado en cuenta las siguientes características.

- a) Ausencia total de plasticidad
- b) Excelente granulometría
- c) Angulo de fricción interna elevado.

De las dos características primeras se deduce que se debe de compactar el material, empleando un equipo con vibración. La tercera característica impone este tipo de equipo como el más aconsejable para compactar en obra estos materiales con mucha fricción.

Para lograr una buena compactación en estos materiales, se debe de emplear aparte del compactador con vibración un compactador de neumáticos con gran peso por rueda y presión de inflado elevada.

Desde el punto de vista de la clasificación de suelos, estos materiales son gravas bien o mal graduadas, con contenido de finos o sin ellos.

Estos materiales presentan problemas de compactación ya que los elementos muy gruesos pueden bloquearse los unos con los otros y dejar huecos importantes entre ellos que posteriormente causan problemas de asentamiento y deformación, a consecuencia de fragmentaciones y movimientos pequeños en el material.

Para facilitar la compactación en estos materiales, se pueden fraccionar para obtener un material que sea una grava más o menos plástica.

Si el material es blando y los elementos grandes se podrán disminuir hasta tamaños de 30 ó 50 cm. y la compactación se hace con un rodillo de rejillas que completará la fragmentación del material.

Para realizar la fragmentación del material, puede emplearse pisos gruesos.

El trabajo de fragmentación será en lo general caro de los elementos gruesos, la compactación del material se hará en capas muy gruesas, la compactación del material se hará en capas muy gruesas, del orden de los elementos más grandes que se acenten. Por lo regular las capas tendrán de 1 a 1.50 mts. de espesor.

Para una compactación aceptable se deberá observar las siguientes precauciones indicadas por Tamsi*

* Referencia 8

a) Para obtener un buen resultado habrá que utilizar máquinas vibrantes pasadas.

Se puede utilizar además pisones grúas de caída libre, que actúan por compactación y reducción de huecos al rededor de los elementos gruesos en estos materiales.

b) En estos materiales es imposible controlar la compactación empleando un densímetro, cualquiera que sea el modelo.

El control debe hacerse observando los asientos del material y no parar la compactación hasta que los asientos no aumenten más. Para observar el asiento, se utiliza "El Medidor Electrónico de Asientos", que ha sido elaborado para este tipo de terraplenes.

c) De vez en cuando, es conveniente hacer en el terraplén una zanja para observar si los bloques grandes están bien encajados.

COMPACTACION DE PEDRAPLENES

Los pedraplenes, en la técnica moderna de carreteras se están empleando mucho. Son terraplenes de gran altura constituidos con fragmentos de roca y suelos gruesos. Los pedraplenes se usan en las vías terrestres cuando se requiere cruzar una barranca o arroyo, o de que la pendiente y curvatura sean mayores.

Los suelos gruesos y los fragmentos de roca que forman un pedraplen, tienen serios problemas con la compresibilidad por los altos niveles de esfuerzo a que están sujetos.

En épocas pasadas la roca utilizada en los terraplenes se consideraba como material inerte, del que no se esperaban problemas en su comportamiento. Pero al ir aumentando la altura de los terraplenes o la altura de los pedraplenes modernos el nivel de esfuerzo va aumentando haciendo que muchas situaciones actuales difieran de las pasadas.

Actualmente en la técnica de construcción de carreteras se acepta que la base del pedraplen se forme rellenando el fondo de la barranca, sin ningún tratamiento previo de éste, colocando el material a volteo, hasta tener una superficie amplia en que se pueda trabajar con el equipo pesado.

El colocar la roca a volteo produce una segregación total del suelo y lo hace muy compresible.

Las observaciones realizadas en terraplenes de prueba y los resultados de ensayos recientes, han modificado la manera de pensar de los ingenieros, en la construcción de estas estructuras y en su comportamiento.

La construcción de un pedraplen requiere de un estudio de clasificación de los materiales para el enrocamiento. También deben de realizarse pruebas índice que permitan distinguir los materiales limpios de los contaminados, etc.

En la compactación de los pedraplenes se debe de tomar muy en cuenta la compresibilidad y la resistencia de los enrocamientos limpios, así como para los relativamente más contaminados. La granulometría del enrocamiento, tiene gran influencia en los resultados de compactación de éstos y, para una misma energía de compactación, el material bien graduado adquiere una compacidad mayor que el uniforme. Por lo general, no es posible tener materiales para pedraplen que tengan buena granulometría, sobre todo cuando la roca se extrae de la explotación de macizos rocosos con explosivos ha no ser que la fragmentación natural de la roca induzca a la obtención de un material bien graduado la obtención de grava-arena de ríos tienen por lo general buena granulometría y granos sanos, por lo que constituyen buenos materiales. También se puede mejorar la granulometría evitando que se segregue el material durante las maniobras de transporte y tendido del pedraplen.

La segregación es poco significativa en materiales de granulometría uniforme.

La compacidad que adquieren los enrocamientos después de ser compactados no es fácil de medir, si los fragmentos no son muy grandes se usa el concepto de compacidad relativa.

Los enrocamientos se compactan con rodillos lisos vibratorios con pesos de 10 a 15 ton. cuando son relativamente limpios y no están formados por elementos muy grandes, de más de 30 cm. Los materiales gruesos bien graduados o de poca altura pueden compactarse con un tractor pesado (bandeando) con un mínimo de 4 pasadas.

Los enrocamientos contaminados, con más de 15% de finos plásticos se han compactado con rodillos neumáticos muy pesados de 50 ton. o más, obteniendo buenos resultados.

El espesor de las capas de un pedraplén varían de acuerdo al tamaño de los elementos gruesos. Si el material tiene menos de 30 cm. las capas se disponen de 50 cm. de espesor en estado suelto. Cuando los elementos de roca son mayores el espesor de la capa puede ser de un metro o más.

La experiencia ha demostrado que al humedecer el material al colocarlo disminuye la compresibilidad del enrocamiento. Este hecho se ha investigado en el laboratorio, donde se ha visto al hacer pruebas de compresibilidad en materiales gruesos y someterlos en un momento dado a un humedecimiento intenso, se produce en ese momento un aumento rápido de la deformación. De esto, el humedecimiento del pedraplén durante la construcción evita deformaciones posteriores.

El aumento rápido de la deformación con el humedecimiento no está del todo claro, pero se ha relacionado con cierto reblandecimiento de las aristas y picos de los elementos de roca, que resisten menos cuando se humedecen.

La información en la actualidad dice que el agua debe de incorporarse a razón de 300 ó 400 lt/m³.

CAPITULO QUINTO

CONCLUSIONES

La compactación es un proceso en el que se mejoran las características y propiedades de los suelos, para que estos resistan esfuerzos y cargas que actuarán en él en una obra de ingeniería determinada.

Para obtener un buen resultado de compactación se debe hacer un estudio de laboratorio y de campo que determine las propiedades y características que se desea mejorar con el proceso de compactación.

En el laboratorio se reproduce el problema de compactación de los suelos, para aplicarlo con buenos resultados en los problemas de compactación de campo. Los resultados de laboratorio se deben de verificar para no cometer errores en la compactación de campo.

El laboratorio nos determina dos fases importantes de la compactación de los suelos.

- a) La representatividad
- b) El control de calidad

Por lo anterior, la compactación de campo se realiza de acuerdo a los resultados que da el laboratorio de mecánica de suelos.

La compactación de campo se realiza con diferentes equipos mecánicos de diferentes pesos y tamaños, y diferentes formas de aplicar la energía de compactación al suelo.

El control de calidad de los trabajos de compactación de campo, se hace con la comparación de los pesos volumétricos secos (V_s), obtenidos en la prueba de compactación de laboratorio y el obtenido en la compactación

de campo, esta relación es el grado de compactación de un suelo."

Se debe tomar en cuenta para el control de calidad que, este índice, solo relaciona los pesos volumétricos y no toma en cuenta la similitud de las propiedades mecánicas entre ambos.

Si la obra por realizar es de gran importancia se deben de hacer estudios mas detallados que relacionen las propiedades y características — del suelo compactado en campo y en el laboratorio.

Los suelos granulares (arenas) con gran contenido de finos, tienen un comportamiento parecido al de los suelos finos y para compactarlos se tratan como tales.

Los suelos granulares bien graduados con poco contenido de finos, — no presentan problemas para compactarse, el laboratorio de mecánica de — suelos nos determina el equipo y el espesor de la capa con que debe compactarse.

Los suelos granulares mal graduados, presentan problemas al compactarlos, debido principalmente a que predomina un solo tamaño entre las — partículas del suelo, esto hace que al aplicar una energía de compactación las partículas se desplazan entre ellas pero no logran un acomodo ni un encaje de sus partículas para obtener una mejor resistencia al corte.

Para compactar estos suelos, se debe de triturar el material con lo que se obtiene una mayor variedad de tamaños de las partículas que componen el suelo y se puede compactar con mayor facilidad.

Actualmente en las bases para la construcción de carreteras se está empleando con gran eficiencia las "gravas tratadas".

A estas gravas se les agrega cemento ó escoria granular que hace que

el material obtenga una buena granulometría, un ángulo de fricción interno elevado y que el material sea no plástico. Con estas características al compactar las gravas tratadas se obtienen pesos volumétricos secos de 100% o más del obtenido en la prueba Proctor modificada.

Cuando se tiene material con elementos muy gruesos, se deben de fragmentar estos, para poder obtener una buena compactación de este material. Si se tiene elementos de 30 y 50 cm. se puede compactar el material con equipo vibratorio pesado en capas de 50 y 100 cm. respectivamente.

Si se tiene elementos mayores de 50 a 100 cm. pero con gran variedad de tamaños se puede acomodar el material con un tractor y después bundeag lo con el mismo obteniendo un buen resultado.

REFERENCIAS:

1. Mecánica de suelos Tomo 1 Juárez Badillo o Rico Rodríguez
Tercera Edición. -
2. Mecánica de suelos. Editorial Limusa T. William Lambe & Robert V. Whitman
México 1974
3. Principios de Geología y Geotecnia D.P. Drynine o W.R. Judo
para ingenieros. Editorial Omega.
Tercera Edición.
4. La Ingeniería de Suelos en las Vías Alfonso Rico Rodríguez y Hermilo
Terrestres. Volumen 1. Editorial del Castillo
Limusa. Primera Edición 1976
5. Resistencia y Comprensibilidad de Raúl J. Marsal
Enrocamientos y Gravas
Instituto de Ingeniería
Agosto 1972 - 306
6. Suelos Granulares: Modelo Estadístico, Raúl J. Marsal
Teoría de Falla y Relaciones
Esfuerzo Deformación
Instituto de Ingeniería
Julio 1971 - 290
7. Apuntes de Movimientos de Tierras
UNAM Facultad de Ingeniería
Tomo 1
8. Compactación en Carreteras y Aereo— Georges Arquíé
puertos.
Editores Técnicos Asociados, S.A.
Barcelona - España - 1978

