



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

28

81

Estudio Económico sobre la Conveniencia de la Compactación de Materiales por Capas Delgadas.

T E S I S

Que para obtener el Título de.

INGENIERO CIVIL

P r e s e n t a :

Fernando García Suárez



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.

INDICE

CAPITULO I. INTRODUCCION

- 1.1 Propiedades Físicas y Clasificación de Suelos.
- 1.1.1 Propiedades Físicas.
- 1.1.2 Clasificación de Suelos.
- 1.2 Definición de Compactación
- 1.3 Equipos usados en la Compactación
- 1.3.1 Equipo Pesado.
- 1.3.2 Equipo Ligero.
- 1.3.3 Formas de Compactar, Selección de Compactadores.

CAPITULO II. METODOS DE COMPACTACION.

- 2.1 Generalidades.
- 2.2. Pruebas de Compactación
- 2.2.1 En Laboratorio.
- 2.2.2 En Campo.
- 2.3 Métodos de Proyecto y Progresivo.

CAPITULO III. COMPACTACION POR CAPAS DELGADAS.

- 3.1 Consideraciones Generales
- 3.2 Ventajas

CAPITULO IV. ESTUDIO ECONOMICO.

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFIA

CAPITULO I

INTRODUCCION

Podemos afirmar que la compactación de suelos ha sido durante muchos años, -miles- una técnica fundamental en el ramo de la construcción.

Algunas obras en que la compactación es de aspecto primordial son las siguientes:

- PRESAS DE TIERRA
- DIQUES
- TERRAPLENES PARA CAMINOS
- CARRETERAS
- FERROCARRILES
- BORDOS DE DEFENSA
- MUELLES
- CIMENTACIONES
- CANALES
- AEROPISTAS
- ETC.

Se sabe, por ejemplo, -que en la construcción de los bordos erigidos en América por los Mexicanos en el siglo XV D.C., ya se usaban algunas técnicas de compactación, y que los chinos la empleaban hace más de 4 mil años. En esos tiempos, la compactación sólo se realizaba por medio de una gigantesca y pesada rueda que era tira-

da por esclavos. Otros métodos primitivos incluían llevar borregos de un lugar para otro del terraplén y arrastras con caballos aplanadoras pesadas de madera.

Mucho tiempo después se incorporó el motor de vapor, surgiendo así la primera aplanadora autopropulsada. Luego con la aparición del motor de combustión interna, tanto de gasolina como de diesel, junto con el invento de los neumáticos y la aplicación de técnicas modernas para aprovechar el peso de la máquina, arrojaron como resultado los aparatos compactadores que hoy conocemos, de los cuales haremos reseña durante el desarrollo del presente trabajo.

La anterior es una breve descripción del desarrollo de la compactadora a través de los años, es decir, del elemento que proporciona la energía necesaria para que el suelo se compacte. Pero poco se sabe de las técnicas antiguas en cuanto al proceso que se le daba a la tierra en humedad, espesor de capas, mezcla, etc., para mejorar las condiciones de compactación. Este es un factor indispensable, pues la buena compactación no sólo depende del peso aplicado.

Se sabe por ejemplo, que los primeros caminos -
construidos a principios de siglo, además de ser bien
compactados, se construían a menudo con mayor uniformidad
que algunos caminos actuales. ¿Cómo fue posible esto?

La respuesta es que en las carreteras de ayer, la
compactación muchas veces lograba un mejor acomodamiento
de las partículas. Esto debido a que se construían
con material movido en incrementos pequeños del présta
mo al terraplén en escrepas pequeñas o vagones tirados
por caballos. Este equipo de acarreo era cargado a mano
y el material era automáticamente pulverizado y proce-
sado por los picos y las palas.

Las escrepas pequeñas se cargaban cortando capas
muy delgadas y el material era extendido en capas de 5
a 15 cm. de espesor. La acción de los caballos y las
ruedas de los vagones, provocaban una vibración que pul-
verizaba el material y esto provocaba mejores resulta-
dos.

Sin embargo, en los últimos 40 años ha habido un
gran progreso en la ciencia de la compactación de los
suelos. Los estudios de laboratorio han resuelto muchos
problemas en cuanto al comportamiento de suelos y los

fabricantes han diseñado una amplia variedad de equipo para producir al máximo de compactación con el mínimo de costo.

Ahora y siempre la compactación ha de realizarse de la mejor manera, ya que, exceptuando las características de drenaje correctas, es el factor que tiene mayor influencia en las condiciones funcionales de cualquier obra civil.

Los proyectos de obra cada vez más ambiciosos y programas que los complementan, han originado que los fabricantes del equipo de compactación produzcan máquinas capaces de balancear al tiro con la compactación para evitar interferencia de actividades y pérdida de tiempo, lo que da por resultado una obra económica.

Ese es el motivo del presente trabajo. Realizar un estudio económico de uno de los métodos de compactación y ver cuáles son sus ventajas.

Principia la tesis recordando algunas propiedades de los suelos, conceptos fundamentales para comprender el fenómeno de la compactación. Luego se define ésta

y se describen brevemente los equipos usados para compactar, así como las diferentes formas o tipos que existen para llevarla a cabo.

En el capítulo II, se estudian las pruebas de compactación más usuales tanto en el laboratorio (Proctor, Proctor modificada y Porter) como en el campo (mediciones nucleares, prueba física y otras) para luego describir los métodos de compactación: el progresivo y el de proyecto.

La compactación por capas delgadas se estudia en el capítulo III y se explica cuáles son sus ventajas.

El estudio económico en la compactación por capas delgadas - motivo de la tesis - se realiza en el capítulo IV y al final se indican las conclusiones.

Quedo agradecido con todas las personas que de una manera u otra, hicieron posible la culminación de este trabajo, tan importante en mi carrera profesional.

1.1. Propiedades físicas y clasificación de suelos.

Es indispensable, antes de dar una definición de compactación. familiarizarse con algunos conceptos que definen las propiedades físicas de la tierra, que tienen un efecto directo sobre la facilidad ó dificultad de manejo de la misma; sobre la selección de equipo y sobre las producciones del mismo, (14) así como recordar algunos tópicos sobre clasificación de suelos.

1.1.1. Propiedades Físicas.

a).- ABUNDAMIENTO.- Se define como el incremento en el volumen de la Tierra, debido al aflojamiento que sufre por excavación ó acarreo. Se expresa como porcentaje del volumen original inalterado.

Por ejemplo, si se encuentra que la Tierra que se sacó de un agujero que tiene 1 m^3 presenta un volumen suelto de 1.25 m^3 , el incremento de volumen es 0.25 m^3 ó 25 por ciento. Se dice entonces que esta tierra tiene un abundamiento de 25 por ciento y este porcentaje varía considerablemente según el tipo de tierra. En la Tabla (1) podemos apreciar el abundamiento de algunas clases de Tierra.

b).- ENJUTAMIENTO.- Se define como la reducción del volumen de la tierra a partir del volumen medido en banco, debido a su compactación por los métodos tradicionales que existen y se expresa como porcentaje del volumen original-inalterado.

Por ejemplo, si la Tierra se saca de un agujero que tenga 1 m^3 de volumen y presenta un volumen compactado de 0.9 m^3 , la pérdida en volumen es 0.1 m^3 ó 10 por ciento. -- Cabe hacer notar que para cualquier clase de tierra al porcentaje de enjutamiento cambiará con la extensión y grado de compactación y con la cantidad de humedad presente durante la compactación.

c).- VOLUMEN MEDIDO EN BANCO.- Es el volumen de tierra medido en el banco de préstamo, en la zanja, en el canal, ó en el corte antes de colocarla. En este volumen se basan dos pagos de acarreo.

d).- VOLUMEN EN ESTADO SUELTO.- Es el volumen de tierra, después de que ha sido quitada de su posición natural y depositada en camiones, esrepas, ó en montones .

e).- VOLUMEN COMPACTADO.- También se le conoce como volumen de relleno, y es el que presenta la tierra después de-

que ha sido colocada en un relleno, y compactada. En las obras donde se requiera relleno de tierra compactada se puede usar el volumen en el relleno como base para los pagos.

CLASE DE TIERRA	PORCENTAJE DE ABUNDAMIENTO
a) Arena ó grava limpia	5-15
b) Suelo Superficial	10-25
c) Lama	10-35
d) Tierra común	20-45
e) Arcilla	30-60
f) Roca sólida	50-80

Tabla (1) Abundamiento representativo para diferentes clases de Tierra. Fuente : ver (14)

1.1.2.- Clasificación de Suelos Ver Tabla (1-A)

Nos basaremos para la clasificación en el S.U.C.S.-- (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos). Para una clasificación más detallada ver la referencia (6).

Este método hace la distinción entre suelos gruesos- y finos, valiéndose del cribado, siendo el límite entre ambos la malla no. 200. El material grueso es mayor que dicha malla, y el fino menor. Un suelo se considera grueso si más del 50% de sus partículas son gruesas y fino si más de la mitad de sus partículas, en peso, son finas.

a) .- SUELDOS GRUESOS:

G (GRAVEL) Gravas o suelos en que predominan éstas.

S (SAND) Arenas o suelos arenosos.

El límite entre las gravas y arenas está marcado por la malla no. 4. El suelo será del grupo genérico G si más del 50% de su fracción gruesa-retenida en la malla 200- no pasa de la malla No. 4, y es del grupo genérico S en caso contrario. Además aquí se distinguen.

U.S. Bureau of standards	
mall a numero	abertura mm.
4"	101.6
2"	50.8
1"	25.4
3/4"	19.1
1/2"	12.7
3/8"	9.52
1/4"	6.35
4	4.76
6	3.36
8	2.38
10	2.00
12	1.68
16	1.19
20	0.840
30	0.590
40	0.420
50	0.297
60	0.250
70	0.210
100	0.149
140	0.105
200	0.074
270	0.053
400	0.037

TABLA (1-A) .

FUENTE (6)

- W (Well graded).- Material prácticamente limpio de finos, bien graduado, del que se puede obtener GW y SW.

-P (Poorly graded).- Material prácticamente limpio de finos, mal graduado. En combinación con los símbolos genéricos da lugar a los grupos GP y SP.

-M (Del Sueco Mo y Mjala).- Material con cantidad apreciable de finos no plásticos. Da lugar a los grupos (GM y--SM).

-C (Clay).- Material con cantidad apreciable de finos plásticos. Da lugar a los grupos GC y SC.

b).- SUELOS FINOS

-M (Del Sueco Mo y Mjala) Limos inorgánicos.

-C (Clay) Arcillas Inorgánicas.

O (Organic) Limos y arcillas orgánicas.

Cada uno de estos 3 tipos de suelos se subdividen, según su límite líquido, en 2 grupos. Si éste es menor del 50%, es decir, si son suelos de compresibilidad baja o media, se añade al símbolo genérico la letra L (Low Compresibility), obteniéndose por esta combinación los grupos -

MH, CH y OH.

Los materiales FRICCIONANTES son principalmente - gravas y arenas; entendiéndose por fricción interna la resistencia al desplazamiento entre las partículas internas del material.

Los materiales COHESIVOS son arcillas y limos arcillosos, siendo la cohesión la atracción mutua de las partículas de un suelo debido a las fuerzas moleculares y a la presencia de humedad.

1.2.- Definición de Compactación.

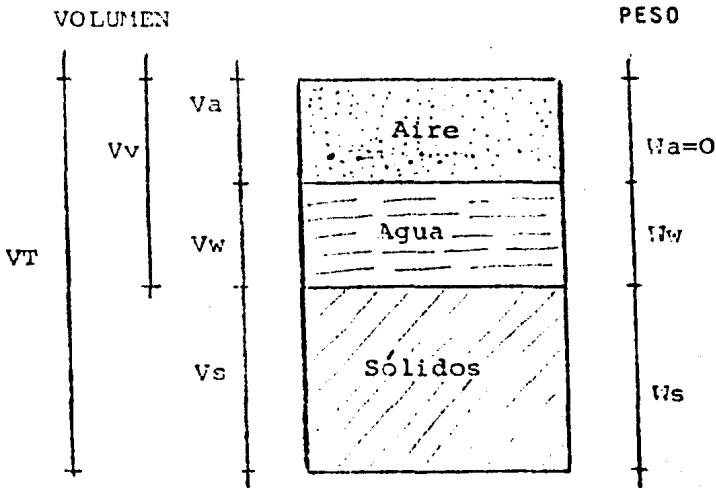
La palabra "compactación" proviene del adjetivo -- "COMPACIO" que a su vez deriva del latín "COMPACTUS", participio pasivo de "COMPINGER" que quiere decir Unir, Juntar. Según el Dr. Juárez Badillo (6) se entiende por compactación de los suelos el "mejoramiento artificial de sus propiedades mecánicas (relación esfuerzo-deformación y resistencia) por medios mecánicos" y su importancia estriba en el aumento de resistencia y disminución de capacidad de deformación, que se obtiene al sujetar el suelo a técnicas convenientes que aumentan su peso específico, disminuyendo sus vacíos. La mayor densidad, le permitirá

al suelo soportar cargas más pesadas sin un exceso de --
asentamiento.

El suelo, antes de ser compactado, consiste en un --
sistema de 3 fases: partículas sólidas, un líquido (agua)
y un gas (aire). Las proporciones en las que estos 3 eleme
mentos, se presentan, puede esquematizarse tal como se ve
en la figura (1). Por V_s entendemos el volumen ocupado -
por las partículas sólidas, V_w es el volumen ocupado por
el agua y V_a el ocupado por el aire. La suma de estos-
2 últimos constituye V_v , volumen de vacíos ó de poros.

Inicialmente, el volumen de aire es grande, pero la
compactación viene a reducirlo. No puede haber práctica-
mente variación del volumen del sólido y tampoco existe,
excepto en muy raros casos, una reducción del volumen de
agua. Esto último porque salvo en el caso de suelos extre
madamente permeables, tales como arenas gruesas y limpias,
la compactación haría efecto sobre la reducción de dicho
volumen de agua.

En un caso teórico, la máxima reducción de volumen--
que en forma absoluta se podría conseguir, corresponde a--
la eliminación total de aire, quedando el suelo saturado.
En realidad no se puede llegar a este extremo. Cuando el-



- HUMEDAD ó CONTENIDO DE AGUA----- $w = \frac{Ww}{Ws}$
- GRADO DE SATURACIÓN ----- $G_w = \frac{Vw}{Vv}$
- PESO VOLUMÉTRICO SECO ----- $\delta'_d = \frac{Ws}{Vt}$
- PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE LOS SÓLIDOS $S_s = \frac{Ws}{Vs}$

D= P.E.R. DEL AGUA (a°C)

- Relación de Vacíos ----- $e = \frac{Vv}{Vs}$
- Porosidad ----- $n = \frac{Vv}{Vt}$
- Compacidad ----- $c = \frac{Vs}{Vt}$

FIG. 1 DEFINICIONES FUNDAMENTALES.

grado de saturación (ver fórmula en Fig. 1), es decir la relación entre el volumen ocupado por el agua y el volumen ocupado por la totalidad de los vacíos es pequeño, la permeabilidad de los suelos es grande y por lo tanto es fácil producir su expulsión bajo un apisonado dinámico. Sin embargo, cuando el grado de saturación llega a ser alto, por encima del 80 o 85 por ciento, la permeabilidad -- baja enormemente. Esto se debe a que inicialmente, todos los poros se encuentran comunicados, hallándose el agua en una forma de película continua que envuelve a las partículas. Pero al disminuir la proporción de aire, este llega a quedar en forma de burbujas aisladas entre sí, que constituyen una especie de suspensión o emulsión de aire en agua. El conjunto se comporta como un todo homogéneo. La expulsión de las burbujas no puede hacerse más que mediante la expulsión de una cierta cantidad de líquido, lo cual, como se dijo anteriormente, no puede ser producido por procedimientos convencionales.

Cuando se utiliza el suelo para la construcción de una presa de tierra, por ejemplo, a mayor densidad se obtendrá mayor estabilidad en la estructura y reducirá el peligro de filtraciones a través de la presa.

Un buen ejemplo de este caso que se ha desarrollado en la construcción mexicana, lo podemos encontrar en la presa Madín, la cual se encuentra ubicada sobre el río Tlalnepantla, al oriente de ciudad Satélite en el Estado de México, cuya construcción se inició en Septiembre de 1974 y se terminó en Enero de 1977.

Su objetivo, es el control de avenidas para protección contra inundaciones de los municipios de Naucalpan de Juárez, Atizapán de Zaragoza y Tlalnepantla de Baz, que se encuentran aguas abajo del sitio, además del provecho de 1.1 m³/segundo de agua potable.

En esta presa, considerando las características y abundancia de los materiales granulares y las dificultades para la explotación del material arcilloso, el tipo de cortina--diseñado fue de materiales graduados, con núcleo de material impermeable, zonas de transición a ambos lados del núcleo, respaldos de material producto de la explotación de la roca, y protecciones de roca en ambos taludes, como se puede observar en la figura (2).

Obsérvese también que, bajo el respaldo de aguas arriba se compactó una capa superficial de 1 metro de arena mediana a fina, a manera de delantal. El procedimiento y coloca-

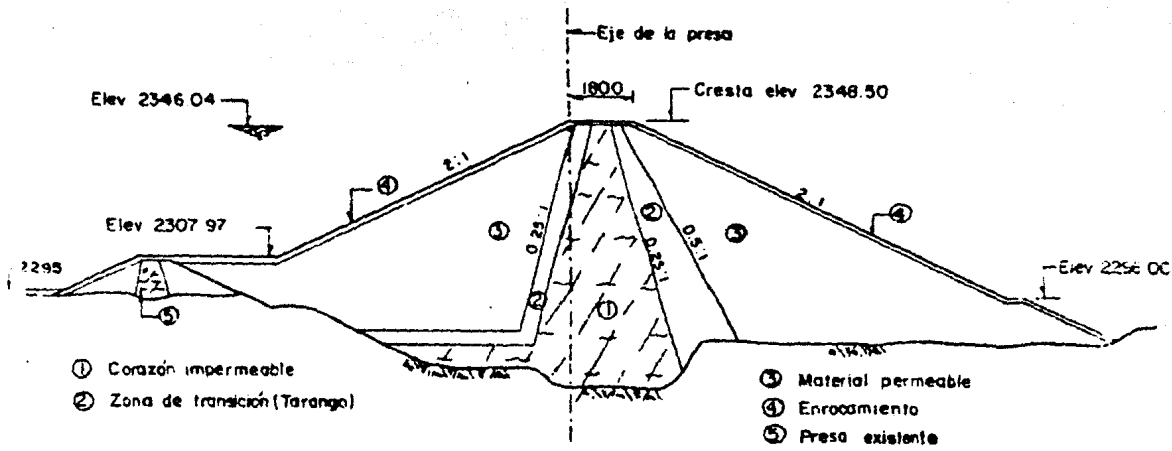


Fig 2 Sección de proyecto de la cortina

Fuente: Referencia (4).

ción de los materiales se puede observar en la tabla (2).

Material No.	Zona de la cortina	Descripción de los Materiales	Procedimiento de colocación
1	Núcleo impermeable	Arcilla tipo CH de alta compresibilidad y baja resistencia al esfuerzo cortante.	Capas de 20 cm en estado suelto con 10 pasadas de rodillo "pata de cabra"
2	Transiciones	Material de la formación Tarango.	Capas de 30 cm compactando con rodillo liso vibratorio.
3	Respaldos permeables.	Rezaga, producto de la explotación de la roca.	Capas de 50 cm bandeada con tractor
4	Taludes exteriores	Roca, producto explotación de banco.	A volteo y acomodada con tractor.

TABLA 2 COLOCACION DE

MATERIALES EN LA PRESA

MADIN

FUENTE (4)

1.3. Equipos Usados en la Compactación. (Figuras de la 3 a la 6),

Los equipos compactadores de suelos los podemos dividir de la siguiente manera:

1.3.1. Equipo Pesado.

a- Aplanadora de tres rodillos lisos.

b- Compactadora Tándem.

c- Compactadora para Zanjas.

d- Aplanadora portátil.

e- Rodillo Vibrador liso.

f- Rodillo Pata de Cabra.

g- Rodillo de Zapatas y Rejas.

h- Compactadora de llantas Neumáticas.

i- Compactador Duo - Factor.

j- Equipo Adicional.

S 5-8A AND 8-10.5A TANDEM ROLLERS

Weights: Variable, 5-8 ton or 8-10.5 ton
Drive: Hydrostatic
Steering: Hydrostatic with steering wheel
Speeds: 0-9.25 m.p.h. (0-14.9 km.p.h.)
Engine: Detroit Diesel
Multi-position steering wheel is optional

S 3-5 TANDEM ROLLER

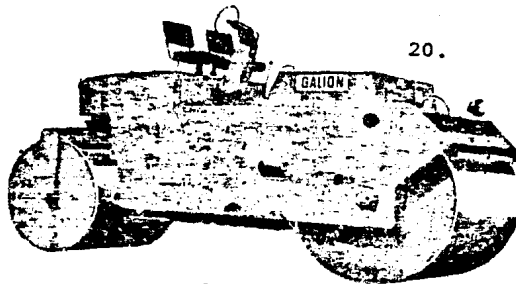
Weight: Variable, 3-5 ton
Drive: Hydrostatic
Steering: Hydrostatic with steering wheel
Speeds: 0-6 m.p.h. (0-9.7 km.p.h.)
Engine: Waukesha Diesel

**S 4-6 RETRACTABLE WHEEL
TANDEM ROLLER**

Weight: Variable, 4-6 ton
Drive: Hydrostatic
Steering: Hydrostatic with steering wheel
Speeds: 0-6 m.p.h. (0-9.7 km.p.h.)
Engine: Waukesha Diesel
Transport wheels and towing attachment are raised
and lowered hydraulically

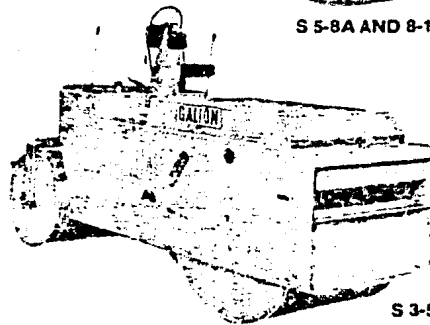
P3500A PNEUMATIC TIRE ROLLER

Weight: 31,500 lbs. (14,286 kg) maximum ballastable
Drive: Roll-O-Matic
Steering: Hydrostatic
Speeds: 3.5-22.1 m.p.h. (5.6-35.5 km.p.h.)
Engine: Waukesha Diesel

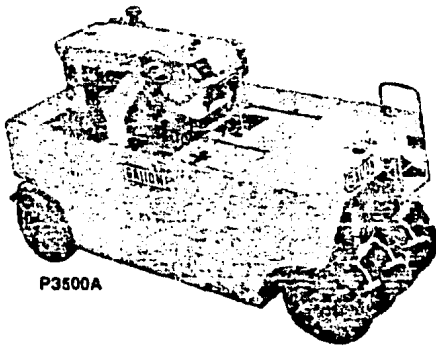


20.

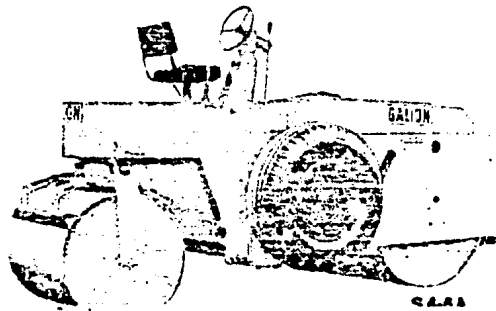
S 5-8A AND 8-10.5A



S 3-5A



P3500A



S 4-6A

Fig. 3. Rodillos Estáticos.

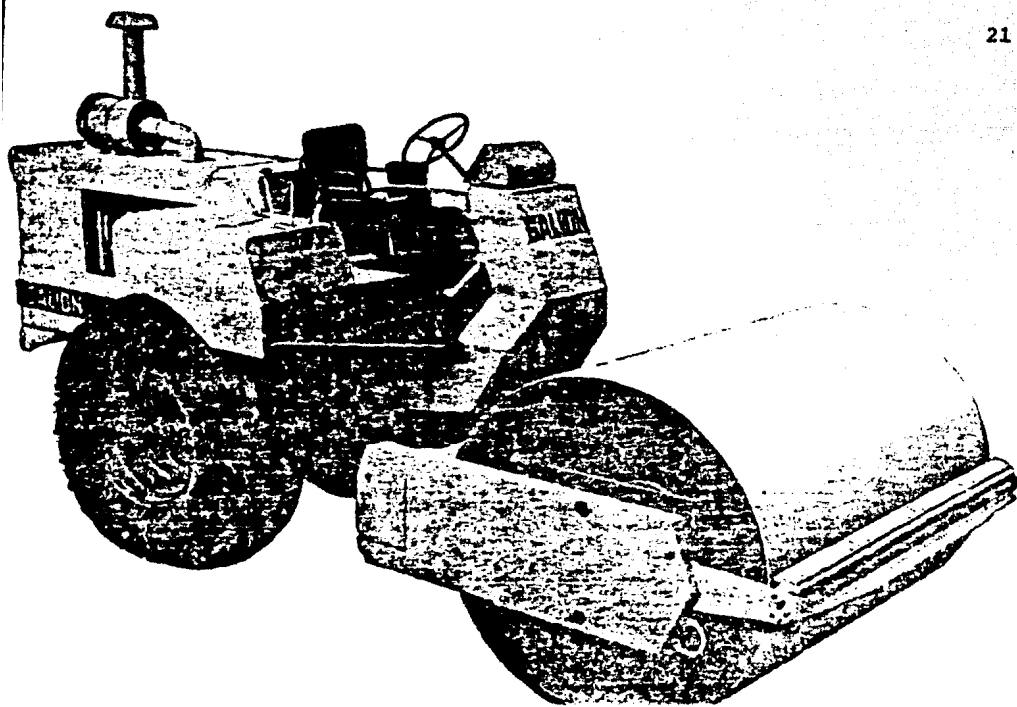


Fig. 4 Rodillo Vibrador Liso.

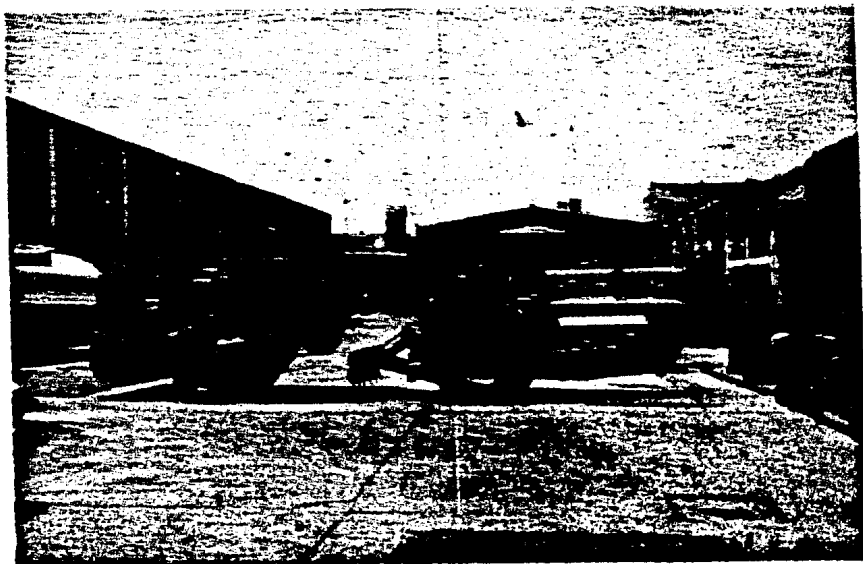


Fig. 5 Duo - Pactor

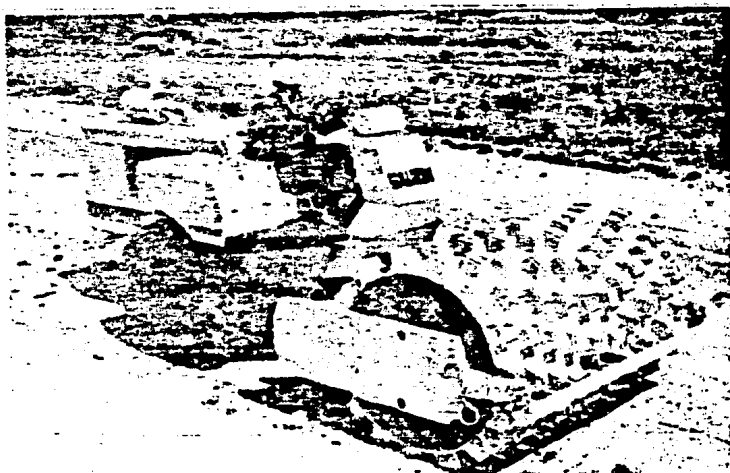


Fig. 6 Rodillo vibrador de zapatas

a) Aplanadora de tres rodillos lisos.- A semeja la forma de un triciclo pues en la parte posterior tiene un par de rodillos grandes de impulsión y enfrente uno de dirección más pequeño pero más ancho; su peso varía entre 5 y 15 toneladas de peso, y es posible aumentarlo mediante la colocación de tapas laterales sobre los rodillos traseros, que generalmente se lustran con agua, arena ó acero. Son aparatos accionados a base de diesel ó gasolina, y frecuentemente están equipados con limpiadores en capa rodillo, para evitar que el material se pegue a éstos.

Usos.- Se utilizan en la construcción de la mayoría de las superficies bituminosas y en el aplanado de caminos de grava y algunos subrasantes; son muy frecuentes en trabajos ligeros de rellenos y en particular en la compactación de pavimentos, bases, sub-bases, caminos, calles, etc.

b) Compactadora Tandem- Esta máquina tiene de dos a tres ejes en Tandem y de la misma anchura, aunque el tamaño y la compresión de los primeros es mayor. Está diseñada principalmente para el acabado terso de las carpetas asfálticas de primer orden y su peso oscila entre dos y veinte toneladas, y algunos modelos varían su rodillo ---

de guía central, por uno de acción vibratoria, que se levanta para trabajar como tándem de dos ejes o se baja para funcionar como un Tandem estándar de ejes.

Usos.- Se usa frecuentemente en la compactación de carpetas de carreteras, pistas de aeropuertos, pavimentaciones asfálticas, de baches, zanjas y de lugares reducidos que no requieran de un alto grado de confinamiento.

c) Compactadora Portátil.- Esta máquina tiene semejanza con la del tipo Tándem de 2 ejes, con la diferencia de que lleva un par de llantas neumáticas para poder ser remolcada por un camión o tractor e inclusive alcanzar velocidades normales en las carreteras. Cuando va a dar servicio en otra, las 2 llantas se suben y los rodillos quedan listos para usarse.

Usos.- Tiene las mismas funciones que la compactadora Tándem, excepto que tiene una aplicación más rápida -- y efectiva, cuando se trata de ser transportada de un lugar a otro en poco tiempo.

d) Aplanadora para zanjas.- De un lado tiene una llanta neumática normal y del otro dos rodillos delgados en -

Tándem, que son los que desempeñan el trabajo de compactación, introducidos éstos dos últimos sobre la zanja, -- por lo que esta máquina tiene la capacidad de ajustarse a la profundidad de diferentes zanjas y es autopropulsada por motor de diesel ó gasolina.

Usos.- Es útil para la compactación de rellenos en pavimentos y zanjas, y para cuando la franja de los caminos es angosta.

e) Rodillo Vibrador liso.- Se compone de un tambor ó rodillo liso vibratorio y de un rodillo bastidor apoyado sobre el eje del primero. Un dispositivo con suspensión elástica, cambiando sobre el eje del tambor y consistente en una combinación de resortes y elementos de caucho, impide la transmisión de las vibraciones al bastidor y motor, y puesto que los resortes soportan todo el peso del armazón, el caucho sólo sirve como amortiguador. El bastidor se puede lastrar con agua, arena ó bloques de concreto y lleva montada en su parte trasera un motor diesel -- con arranque eléctrico. (Figura 4).

Usos.- Es muy efectivo para compactar materiales granulares y sub-resantes de carreteras y aeropuertos, terracerías, sub-bases y bases.

f) Rodillo "Pata de Cabra". - Del tambor sobresalen una serie de patas de acero que trabajan apisonando el material de fondo, logrando así una confinación profunda. Presentan como característica fundamental compactar el suelo de abajo hacia arriba, ejerciendo un efecto de amasado en el mismo por medio de las "patas de cabra". Los más usuales ejercen presiones sobre el suelo entre 10 y 40 Kg/cm²; si bien, cargándolos con agua y arena, es probable elevar estas presiones hasta valores del orden de 80 Kg/cm² ó más. Los hay de propulsión propia ó remolcados por medio de tractores de llantas u orugas.

Las "patas" son usualmente de 18 a 24 cm. de largo y espaciadas entre sí de 15 a 25 cms. en cualquier dirección

Usos.- Constituyen la herramienta estándar para la compactación de Terrapenes, bases de carreteras de primer orden y en general materiales con gran contenido de arena y limo.

g).- Rodillo de Reja. Se conoce también como apistado-- res de reja o de parrilla y son muy semejantes en figura a los compactadores de rodillo vibratorio, ya que éste-- lleva con su superficie una especie de malla formada por barras entrelazadas y de cara bastante ancha, a todo lo-- largo del cilindro.

Existen también de autopropulsión o remolcados por medio de tractores y su bastidor lacetrable con agua, are-- na o bloques de concreto.

Usos.- Se utiliza en carreteras secundarias y cami-- nos de acceso; para la compactación de terraplenes reve-- tidos de roca suelta, a base de triturarla y en la recu-- peración, de los agregados disgregan el material, quebrán-- dolo y pulverizándolo simultáneamente.

h).- Compactador de Llantas Neumáticas.- El cuerpo princi-- pal lo constituye una caja lastrable y 2 ejes de ruedas: - uno trasero con llantas motrices y uno delantero de direc-- ción. Las llantas están colocados de tal manera que el -- compactador acomodado en línea recta, no se le crucen -- las huellas de los delanteras con los traseras, y son de-- movimiento oscilatorio y de rodadura lisa. Cuando se tra--

ta de máquinas autopropulsadas (porque también les permite desarrollar velocidades hasta de 25 km/hora. (Fig. 3)

Usos: Sobre todo se utilizan para la compactación final de la capa superficial de terracerías, bases, sub-bases, y revestimientos de arcillas y limos.

1) Compactador Duo Pactor.-La Duo-compactación, consiste en la aplicación mixta de un rodillo metálico con un eje provisto de llantas neumáticas de alta presión y gran penetración, según la definición de Harry J. Seaman-inventor del Duo-Pactor (ver fuente 20). Se denomina "Bell Cranck", al mecanismo que articula a los ejes metálico y neumático y éste permite variar la fatiga aplicada al suelo sin aumentar ni disminuir lastre y sin que el operador tenga que bajarse de su asiento, como en el caso de las aplanadoras de 3 rodillos, que requerían herramientas, mecánicos y tiempo para variar al peso estático de 12 a 14 toneladas atornillando contrapesos en las ruedas, por lo que la hace una máquina de las más modernas y versátiles. Junto con el Duo - Pactor, surgió el Tri- Pactor, -- que no es sino un Duo-Pactor con vibración en el rodillo liso, pero éste casi ha desaparecido, pues la vibración -- aquí resulta innecesaria, ya que la variación de fatiga -- lograda por el Duo-Pactor le permite compactar eficientemente

una mayor variedad de materiales. Este tipo de compactación está formado por un tractor auto propulsor de 2 llantas, el cual se equipa de un motor diesel y en ocasiones con un escarificador hidráulico en su parte posterior. La caja, que usualmente se lastra con agua o arena mojada, va apoyada sobre el rodillo liso de acero, que proporciona una superficie uniforme y bien terminada, y sobre el eje de ocho llantas neumáticas de pequeño diámetro que, -- colocadas por pares muy próximos entre sí, logran que el desplazamiento del material sea mínimo. Tanto el rodillo neumático como el de acero pueden ser bajados o levantados independientemente por medio de un control hidráulico, por lo que la velocidad promedio de 35 Km/hr que alcanza, permite transitarlo por carretera, sin necesidad de usar un medio de transporte que lo lleve. (Fig.5)

Usos.- Para la compactación de terraplanes, carpetas asfálticas, bases, sub-bases, caminos rurales ó secundarios, calles citadinas, bacheos y estacionamiento.

j) Equipo Adicional.- Cuando una tierra se compacta para realizar cualquier obra, el proceso necesario que se lleva a cabo, una vez que se tiene a disposición la tierra que se va a compactar, en el siguiente: 1) Esparcirla --- 2) Darle la humedad óptima 3) Mezclarla y 4) Compactarla

Esparcir la tierra para un relleno, significa colocarla en capas de espesor uniforme manteniendo una superficie razonablemente plana. Para este trabajo son indispensables las motoconformadoras, aunque en ocasiones -- puede usarse un bulldozer. Las motoconformadoras tienen una cuchilla que puede colocarse a la profundidad que se desee, y girarse a cualquier posición requerida, pudiendo así empujar la tierra hacia adelante ó hacia un lado; aparte de que permite también movimientos de rotación con giros verticales así como desplazamiento en forma lateral; todo esto hace posible que dicha máquina también sea eficiente para el mezclado de los materiales cuando así se requiera, y se obtenga una granulometría adecuada para bases, sub-bases y carpetas.

Para dar la humedad óptima al terreno, el equipo requerido para el transporte de agua a través de grandes -- distancias son las pipas, que consisten en un camión provisto de un tanque cilíndrico de almacenamiento, que por lo general lleva acoplada una bomba de succión para efectuar la carga y descarga del agua. En la parte posterior inferior del tanque, éste tiene adaptado un tubo con perforaciones a todo lo largo, para poder esparcir el agua -- adecuadamente y a una presión constante. Se utilizan en -

general para todas las obras de compactación.

1.3.2. Equipo Ligero

El equipo ligero de compactación son herramientas manuales que se usan en espacios donde no pueden utilizarse máquinas pesadas. O bien donde no es necesario cumplir con una confinación estrictamente especificada.

a.- Pisones de Mano

b.- Pisones de Impacto o Mecánicos

c.- Compactador de Rodillos o Vibratorios.

a) Pisones de Mano .- Están formados simplemente por una placa rectangular o cuadrada de acero, con una agarradera o varilla soldada en la parte superior del cuerpo del apisonador y se acciona levantándose y dejándose caer sobre el suelo tantas veces como sea necesario.

b) Pisones de Impacto o Mecánicos.-Constan de un "pie" o "placa metálica" que produce el efecto compactador y sobre ella un motor eléctrico, de gasolina o aire comprimido, que es el que mueve a la placa sobre el terreno martillándolo, o por vibración o la combinación de ambos. El compactador de impacto llamado "bailarina" pertenece a este grupo.

c) Compactador de Rodillos Vibratorios.- Consiste en

un tambor liso que produce un impacto hasta de 21 toneladas, que es auto propulsado y de acción vibratoria, provocada por un motor de gasolina. Los más comunes llevan atrás una rueda neumática para que la máquina se sostenga vertical y tienen también un brazo metálico horizontal -- que termina en agarradera.

Se utilizan sobre todo en zanjas, compactación de rellenos de drenajes y tuberías y en suelos granulares sueltos.

1.3.3 Selección de Compactadores

Hasta aquí hemos hecho una breve descripción del equipo de compactación clasificado por el tipo de máquina. Sin embargo, es conveniente tener una idea de cuáles son las razones de aplicación de los compactadores según el tipo de terreno. Esto lo podemos observar en la tabla No. 3.

1.3.4. Formas de Compactar

También es conveniente mencionar cuáles son las formas de compactar según el efecto que producen los distintos tipos de aplicación de cargas producidas por los variados compactadores que se han descrito . Estas son:

SELECCION DE COMPACTADORES

TIPO DE MATERIAL		RODILLO DE REJA	RODILLO DE IMPACTO	"PATA DE CABRA"	RODILLO VIBRATORIO	PATA DE CABRA VIBRADOR	RODILLO METALICO	RODILLO NEUMÁTICO
ACABADOS DE PAVIMENTOS Y BASES		ACABADO DE SUPERFICIES ASFÁLTICAS						
		BASES ASFÁLTICAS						
		BASES GRANULARES						
		SUB-BASES GRANULARES						
ROCAS		ROCA CON FINOS						
		●	○		X			
GRAVAS LIMPIAS	GW	GRAVAS BIEN GRADUADAS, MEZCLAS DE GRAVA Y ARENA CON POCO O NADA DE FINOS						
	GP	GRAVAS MAL GRADUADAS, MEZCLAS DE GRAVA Y ARENA CON POCO O NADA DE FINOS						
GRAVAS CON FINOS	GM	GRAVAS LIMOSAS, MEZCLAS DE GRAVA, ARENA Y LÍMO						
	GC	GRAVAS ARCILLOSAS, MEZCLAS DE GRAVA, ARENA Y ARCILLA						
ARENAS LIMPIAS	SW	ARENAS BIEN GRADUADAS, ARENA CON GRAVA, CON POCO O NADA DE FINOS						
	SP	ARENAS MAL GRADUADAS, ARENAS CON GRAVA CON POCO O NADA DE FINOS						
ARENAS CON FINOS	SM	ARENAS LIMOSAS, MEZCLAS DE ARENA Y LIMOS						
	SC	ARENAS ARCILLOSAS, MEZCLAS DE ARENA Y ARCILLA						
ARCILLAS Y LIMOS	ML	LIMOS INORGÁNICOS, POLVO DE ROCA, LIMOS ARENOSOS O ARCILLOSOS LIGERAMENTE PLÁSTICOS						
	CL	ARCILLAS INORGÁNICAS DE BAJA O MEDIA PLASTICIDAD, ARCILLAS CON GRAVA, ARCILLAS ARENOSAS, ARCILLAS LIMOSAS, ARCILLAS POBRES						
	OL	LIMOS ORGÁNICOS Y ARCILLAS LIMOSAS ORGÁNICAS DE BAJA PLASTICIDAD						
	MH	LIMOS INORGÁNICOS, LIMOS MICACLOS O DIFOMACEOS, LIMOS ELÁSTICOS						
	CH	ARCILLAS INORGÁNICAS DE ALTA PLASTICIDAD, ARCILLAS FRANCAS						
	OH	ARCILLAS ORGÁNICAS DE MEDIA O ALTA PLASTICIDAD, LIMOS ORGÁNICOS DE MEDIA PLASTICIDAD						
	PI	TURBAS Y OTROS SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS						
		●	○				X	
		PRIMERA SELECCIÓN		SEGUNDA SELECCIÓN O COMBINACIÓN		POSIBLE REQUIEREN Estricto CONTROL		

TABLA No. 3 FUENTE: (1)

- a) Por presión estática.
- b) Por impacto,
- c) Por vibración.
- d) amasamiento.
- e) Con ayuda de enzimas.

a) Compactación por Presión Estática. Se puede definir como la aplicación de una fuerza por unidad de área.- Su efecto es de arriba hacia abajo, es decir, que las capas superiores se densifican primero que las de abajo.(Fig.7)

Sus desventajas son:

- a.1 Que la compactación de arriba hacia abajo hace -- que el esfuerzo compactador atraviese la parte ya compactada para poder compactar la inferior, y -- por ésto se consuma mayor energía de compactación.
- a.2 Hace que las características granulométricas del material varíen debido a la sobrecompactación de

la porción superior a la capa, que produce fragmentación de partículas.

- a) Fomenta la resistencia de las partículas de un suelo a deslizarse dentro de la masa del mismo; es decir, si produce fricción interna del material.

Sin embargo, resulta ser la más económica, y con resultados satisfactorios, si se aplica por el método de "CAPAS DELGADAS", motivo de este estudio y que analizaremos más adelante, donde requiere poca energía de compactación, evitando la sobrecompactación sin producir fricción interna del material.

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

Cuando una unidad compactadora tiene una frecuencia baja y una amplitud grande, la unidad cae dentro de este tipo de compactación. (Fig. 8)

- c) Compactación por vibración: En este tipo de compactación se somete al material a rápidos y fuertes impactos o vibra

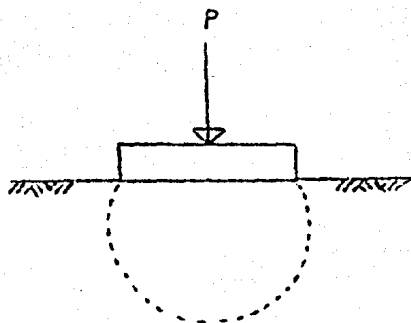


Fig. 7 Compactación
por presión estática.

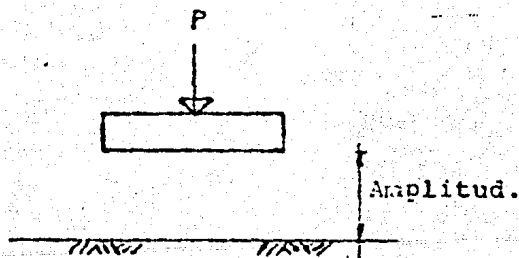


Fig. 8.
Compactación por
Impacto.

ciones entre 700 y 4000 por minuto, dependiendo del compactador, al mismo tiempo que se aplica una cierta presión, - como en la compactación por presión estática, con lo cual se logra una mejor compactación con menor esfuerzo.

La densificación del material se produce de abajo hacia arriba, y las vibraciones hacen que la fricción interna de éste, desaparezca momentáneamente, propiciando el acomodo de las partículas. Su ventaja es que facilita la obtención de los últimos por cientos del grado de compactación que son los más difíciles de obtener, y permite el uso de compactadores más pequeños. (Fig. 9)

d) Compactación por Amasamiento: Aquí la compactación se consigue por peretración y amasamiento más que por efecto del bulbo de presión. El efecto de amasado se produce -- cuando una "pata de cabra" penetra en un material ejerciendo presión hacia todos lados, obligando a parte del agua y aire a salir a la superficie.

El efecto de compactación se produce de abajo hacia arriba, es decir, que las capas inferiores se densifican primero y las superiores después. Por eso se dice que un rodi-

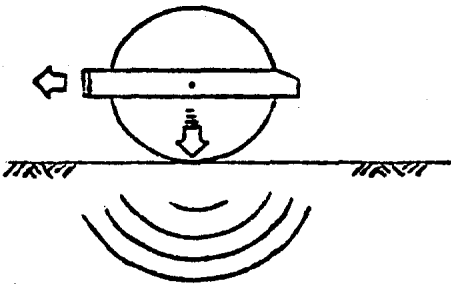


Fig. 9 Compactación por vibración.



Fig.10 Compactación por amasamiento.

llo "pata de cabra" emerge o sale cuando el material se encuentra compactado debidamente.

Estos rodillos se emplean fundamentalmente en materiales cohesivos, ya que su efectividad es casi nula en materiales granulares. (Fig.10)

e) Compactación con ayuda de enzimas. Las enzimas son ciertas sustancias químicoorgánicas que están formadas por plantas, animales y microorganismos, capaces de incrementar la velocidad de transformación química del medio donde se encuentran, sin que sean consumidos por ello en este proceso, llegando a formar parte del consumo.

Las enzimas usadas para compactar, logran esto mediante una reacción química de ionización de los componentes orgánicos e inorgánicos del terreno, permitiendo que esta reacción origine una fusión molecular progresiva, lo que trae como consecuencia que las partículas del suelo se agrupen y se transformen en una masa compacta y firme.

Los productos enzimáticos, se distribuyen en el suelo mezclándolos en el agua usada para compactar. Es necesario hacer notar que las enzimas sólo ayudan a que la compactación se efectúe más rápidamente, pero siempre debe ir -

acompañada con la aplicación compactadora de algún equipo tradicional.

C A P I T U L O I I .

METODOS DE COMPACTACION.

2.1. Generalidades.

En la literatura actual, difícilmente podemos encontrar una descripción amplia y detallada sobre los métodos actuales de compactación de suelos, de manera que cuando se obtienen rendimientos del equipo, no se hace mención del método llevado a cabo y se le da poca importancia a algunas variables como el espesor de capa óptimo y al número de pasadas del equipo.

Es precisamente, en este problema específico, donde -- tratará el presente trabajo de realizar una pequeña contribución a la ingeniería. Existen actualmente dos métodos para la compactación de terraplenes que dependen de la combinación de tiempos y movimientos de la maquinaria que extiende el suelo, con la maquinaria compactadora.

Sin embargo, antes de abordar el tema, es necesario conocer las pruebas de compactación usadas actualmente para conocer las características del suelo a compactar.

2.2. Pruebas de Compactación.

Sería antieconómico conocer la resistencia del suelo

necesaria, especialmente a esfuerzos de compresión y cortante, de un aplanado, ya que el equipo usado para medir estos parámetros es costoso, y no se aplica a todos los suelos, por lo que han surgido a través de los años pruebas tanto a nivel de laboratorio como pruebas de campo.

2.2.1.- Pruebas en Laboratorio.

La función de las pruebas de compactación de laboratorio, es permitir la especificación racional y el control de los trabajos de campo mediante el estudio de las propiedades mecánicas de los suelos compactados y de sus relaciones con ciertas propiedades índices de fácil determinación. Esta función, se cumple sólo en la medida en que los procedimientos de compactación en el laboratorio permiten reproducir, ó asemejar, las condiciones de campo, principalmente el mecanismo, y la energía de compactación.

Se pueden clasificar de la siguiente manera:

- a) PROCTOR.
- b) PROCTOR MODIFICADA.
- c) PORTER.
- d) OTRAS.

a) Prueba Proctor. R.R. Proctor, dedujo que había una correspondencia entre el peso volumétrico seco de un suelo compactado y su resistencia. El equipo necesario para realizar estas pruebas en la obra es económico y sencillo. El método consiste en los siguientes pasos:

- a.-1) Se toma una muestra representativa del suelo - a compactar de humedad conocida.
- a.-2) Se toma un cilindro de 4 pulgadas de diámetro por 4.5 pulgadas de altura; se llena en 3 capas aproximadamente iguales con el material de prueba.
- a.-3) Cada capa se compacta con 25 golpes de un martillo de 2.5 kg. con un área de contacto de 20 cm², el cual se deja caer de 35 cm. de altura (fig.11), todo esto con el objeto de siempre dar al material la misma energía de compactación.
- a.-4) Se pesa el material, y como el volumen es conocido, se calcula el peso volumétrico húmedo -- simplemente dividiendo el peso del material entre el volumen. Como la humedad es conocida, se resta el peso del agua y se obtienen el peso volumétrico seco para esa humedad.
- a.-5) Se repite la prueba varias veces, variando cada

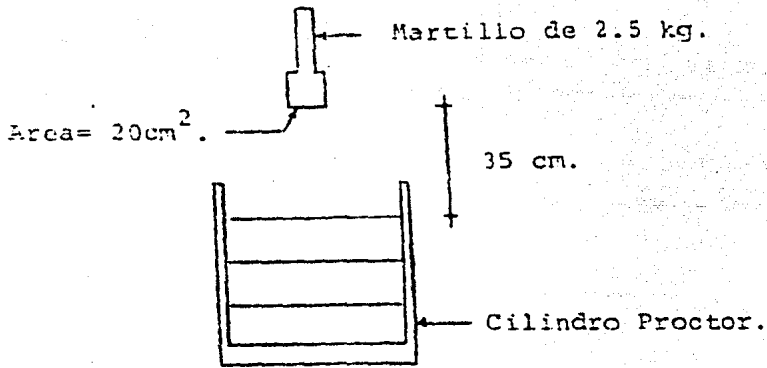


Fig. 11.

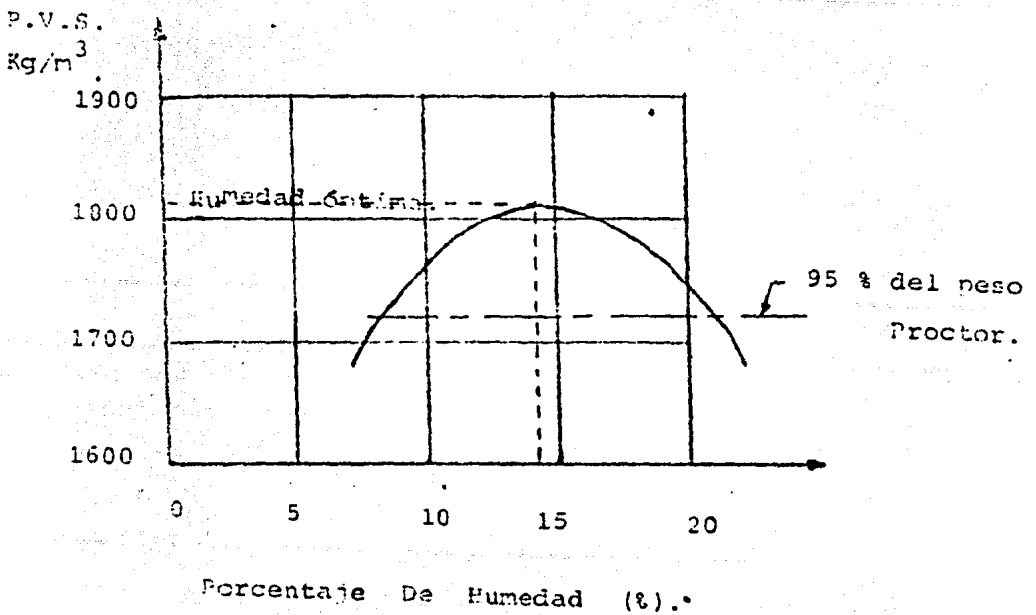


Fig. 12.

vez el grado de humedad, con lo que se obtienen pares de valores Humedad-Peso volumétrico seco.- Con estos pares de valores se dibuja la gráfica de la fig.(12) .

Podemos observar en la gráfica que existe un cierto contenido de humedad para el cual el peso volumétrico es máximo; este peso se conoce como P.V.S.M. (Peso volumétrico seco máximo) o peso Proctor, y el contenido de humedad, como humedad óptima. Siendo así, cuando el proyectista especifica cierto porcentaje, por ejemplo 25% Proctor, en el caso de la gráfica tenemos: $P.V.S.M. = 1820 \text{ kg/m}^3$).

$$25\% \text{ de P.V.S.M.} = 0.25 \times 1820 = 1729 \text{ kg/m}^3.$$

es decir, que el constructor debe tener un peso volumétrico seco mínimo de 1729 kg/m^3 en ese material.

La razón de que la curva P. vs. Humedad presente un máximo es que en todos los suelos, al incrementarse su humedad se les proporciona un medio lubricante entre sus partículas que permite un cierto acomodo de éstos cuando se registran a un cierto trabajo de compactación. Si se sigue aumentando la humedad con el mismo trabajo de compactación

se llega a obtener un mejor acomodo de sus partículas y en consecuencia un mayor peso volumétrico. Si se aumenta más la humedad todavía, el agua empieza a ocupar el espacio que deberían ocupar las partículas del suelo, y por lo tanto comienza a bajar el peso volumétrico del material, para el mismo trabajo de compactación. Siendo así, si se aumenta o disminuye la humedad será necesario aumentar el trabajo del equipo de compactación, lo que en general, no es económico.

b) Prueba Proctor Modificada.

La técnica de la prueba proctor ha evolucionado, y - actualmente se utilizan elementos mucho más potentes, que se traducen en mayor peso y en mayores presiones unitarias aplicadas sobre el terreno; ésto debido a que fueron aumentando las cargas sobre las terracerías por el uso de camiones y aeroplanos cada vez más pesados. Esto llevó a cambios no esenciales en el ensayo de Proctor, aumentando el peso del martillo a 4.5 kg. y la altura de la que deja caer a - 46 cm., además de que el material se compacta en 5 capas.

Las diferencias fundamentales entre la prueba proctor y la Proctor modificada, se pueden observar en la gráfica--

de la fig. (13). Debe hacerse notar que aunque la energía de compactación se ha incrementado 4.5. veces, la densidad solamente se incrementó 8% y que la humedad óptima - disminuyó 3%. La energía específica de compactación se cal
cula en el laboratorio con la siguiente fórmula:

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

en donde:

Ee= Energía específica.

N = Número de golpes por capa.

n = Número de capas del suelo.

W = Peso del pisón.

h = Altura de caída libre del pisón.

v = Volumen del suelo compactado.

También se puede apreciar en la figura, que todas las curvas Proctor quedan a la izquierda de una cierta curva, que representa la función que liga los pesos volumétricos con las humedades, en el supuesto de que todos los poros del suelo estuvieren llenos exclusivamente de agua, es de
cir, que se tratase de un suelo absolutamente saturado.

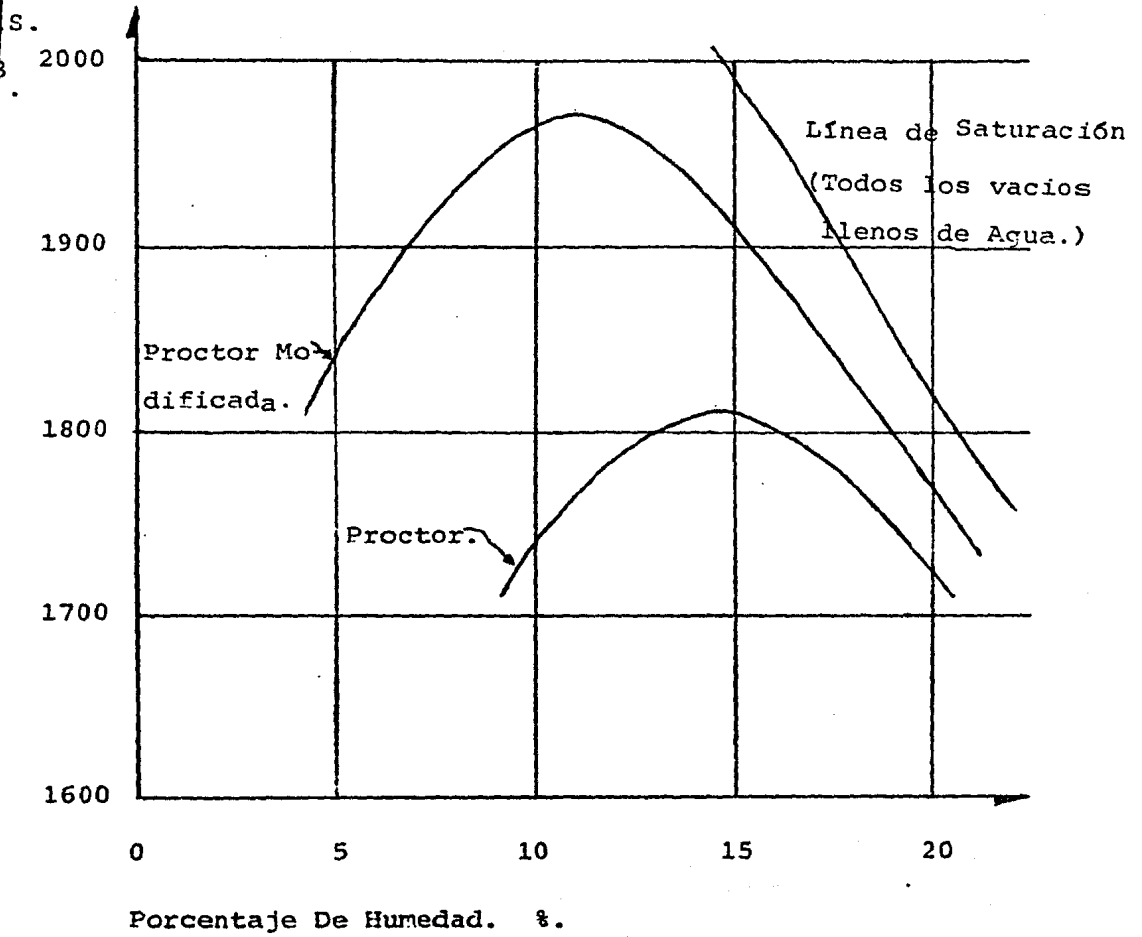


Fig. 13 .

c) Prueba Porter,

Las 2 pruebas anteriores (Proctor y Proctor modificado) han dado excelentes resultados en suelos cuyos tamaños máximos son de 10 mm. (3/8 de pulgada); en suelos con partículas mayores, el golpe del martillo no resulta uniforme y -- por ésto, la prueba puede variar de resultados en un mismo material. Para evitar esta dificultad se ideó la prueba Porter que consiste en lo siguiente:

- c.-1) Se toma una muestra de material a probar y se seca.
- c.-2) Se pasa por la malla de 25 mm. (1 pulgada) y se determina el porcentaje en peso, retenido en la malla; si el porcentaje es menor del 15%, se usará para la prueba el material que pasó la malla. Si el porcentaje retenido es mayor del 15% se separa, del material original, una muestra que pase la malla de 1 pulgada y que sea retenida en la malla -- No. 4; de esta muestra se pesa un tanto igual al peso del retenido, el que se agrega al material que pasó la malla de 1 pulgada; con este nuevo material se procede a la prueba.
- c.-3) A 4 kg. de la muestra así preparada, se le incorpora una cantidad de agua conocida y se homogeniza con el material.

- c.-4) Con este material se llena, en 3 capas, un molde metálico de 6 pulgadas de diámetro por 8 de altura con el fondo perforado. Cada capa se oica 25- veces con una varilla de 5/8 de pulgada (1.2 cm) de diámetro por 30 cm. de longitud con punta de bola.
- c.-5) Sobre la última capa, se coloca una placa circular ligeramente menor que el diámetro interior del cilindro, y se mete el molde en una prensa de 30 toneladas.
- c.-6) Se aplica la capa gradualmente de tal manera que en 5 minutos se alcance una presión de 140.6 kg/cm^2 , la cual debe mantenerse durante 1 minuto, e inmediatamente se descarga en forma gradual durante 1 minuto.
- Si al llegar a la carga máxima no se humedece la base del molde, la humedad ensayada es inferior a la óptima.
- c.-7) Se prosigue por tanteos hasta que la base del molde se humedezca al alcanzar la carga máxima. La humedad de esta prueba es la humedad óptima. Se determina entonces el peso volumétrico seco de la muestra dentro del cilindro; a este peso se le conoce como "peso máximo Porter" y es el peso comparativo para el trabajo de campo.

Por ejemplo, si el diseñador ha pedido 25% Porter, y en la prueba de laboratorio obtuvimos un peso volumétrico seco máximo de 2000 kg/m^3 , en la obra tendremos - que alcanzar un peso volumétrico seco de:

$$0.95 \times 2000 = 1900 \text{ kg/m}^3.$$

A partir de las pruebas de laboratorio anteriores - surgió el concepto de Grado de compactación, definido como la relación entre 2 pesos volumétricos secos. El que tiene el suelo y el máximo adoptado, expresado en por--- ciento.

Sin embargo, el grado de compactación no es un indicador universal, sino que depende de la organización -- que establezca la escala de valores. Por ejemplo, el 100% de compactación de la antigua SAHOP es diferente al de - la SARH o cualquier otro organismo oficial o privado, debido a que las normas de compactación que determinan el peso - volumétrico seco máximo son diferentes en cada caso.

Una desventaja que se presenta también en estos méto dos tradicionales, es que no se toman en cuenta los cambios volumétricos que pueden suceder sobre todo en algunos sue los finos parcialmente saturados. Por ejemplo, en un sue

lo fino arcilloso (CH) de Mexicali, B.C., se mostró que si se compactaba a grados superiores a 95% (Proctor SARH), - los cambios volumétricos cíclicos de humedecimiento y se_ucado aumentaban demasiado (Ver figura 14) para una con-- dición de sobrecarga ligera, como el revestimiento rígi- do de un canal. Esto traería como consecuencia el desa-- rrollo de presiones que agrietarían, las losas de concre- to hidráulico. En condiciones normales, se trata de repa- rar este tipo de daños a base de dar cada vez más compac- tación con resultados evidentemente desastrosos. Si en - el ejemplo anterior se hubiera fijado un grado de compac- tación mínimo de 95 a 100%, sólo porque así está escrito en las normas, seguramente el residente de obra cargaría con la culpa del desastre.

d) Otras Pruebas.

Ultimamente, se han desarrollado pruebas de laborato- rio que no presentan algunos inconvenientes que tienen -- las anteriores, como el de que requieren mucho tiempo, -- bastante trabajo y una cantidad de material que seguido - resulta excesiva.

Una de estas pruebas es la "prueba miniatura", bauti

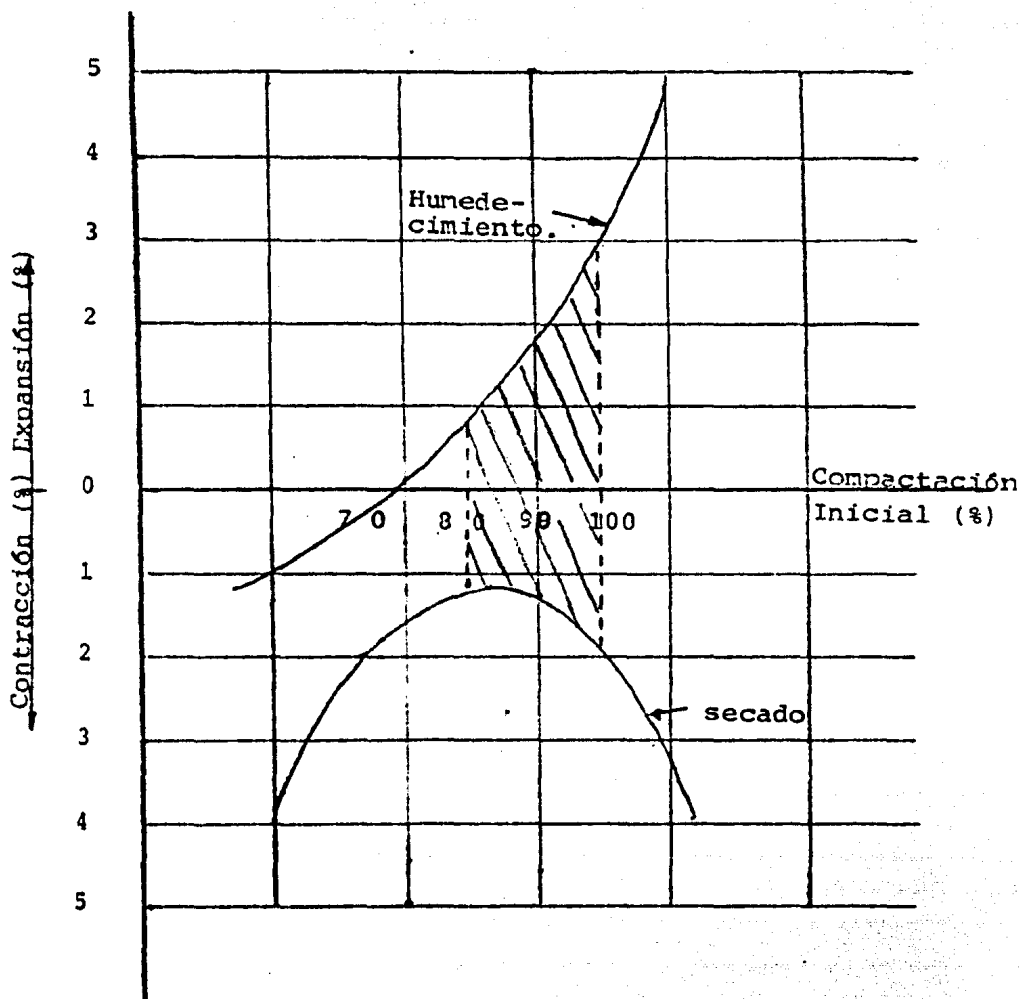


Fig. 14

Fuente (12).

zada así por el hecho de que el molde empleado es de pequeñas dimensiones en comparación con el molde Proctor. - La prueba fue desarrollada por el profesor S.P. Wilson de la Universidad de Harvard en Estados Unidos, y ha sido una de las que ha rendido mejores resultados respecto a los fines perseguidos, pues duplica en forma más aproximada que los métodos dinámicos antes descritos, la acción de amasado de los rodillos "pata de cabra". Sin embargo esta prueba es aplicable únicamente a los suelos finos - plásticos, con partículas menores que 2 milímetros, que son los suelos que se compactan en el campo con tales rodillos.

La prueba se logra presionando estáticamente un émbolo, que es una barra metálica de 1.3 cm. de diámetro con un mango de madera, dentro del cual actúa un resorte calibrado para lograr transmitir una presión constante. Esta presión se transmite a la superficie de las diversas capas con que se constituye la muestra, la cual se introduce en un molde que está formado por una cámara cilíndrica metálica de 3.3. cm. de diámetro interior y 7.2 cm de altura.

Una vez efectuada la presión en las capas requeridas

se extraen para ser introducidas en un horno, a fin de determinar su contenido de agua. Luego se compactan otros - especímenes con contenido de agua creciente, hasta que el peso húmedo de la muestra vaya decreciendo, lo que indica que se ha sobrepasado el contenido de agua óptima.

El peso específico seco correspondiente a cada contenido de agua podrá calcularse con la siguiente fórmula.

$$d = \frac{m}{100 - W(\%)} \quad \times 100$$

d = Pesos específico seco

W = Contenido de agua

m = Peso específico del material

Los métodos más empleados en los Estados Unidos, son los estandarizados por la Asociación Estadounidense que - representa a los Departamentos de Carreteras de todos los Estados de la Unión, más conocida por AASHO (American -- Association of State Highway Officials). A continuación indicamos brevemente estos métodos:

- a) Método AASHO Standard T-99: Este método corresponde, en líneas generales, al conocido ya antes mencionado Standard o Proctor. La diferencia básica con el método Proctor está en el empleo de dos cilindros o moldes

para los ensayos de compactación, uno de 4 pulgadas de diámetro interior (que era el empleado anteriormente) y otro molde de 6 pulgadas de diámetro interior. El martillo o pison es de 5.5 libras (2.5 kg) de peso. El material a emplearse se coloca en capas de aproximadamente igual espesor y cada capa se compacta haciendo caer el martillo desde una altura de 12 pulgadas (30.5 cms.). Si se utiliza el molde pequeño de 4 pulgadas, el material se compactará haciendo caer el martillo 25 veces sobre cada capa. - En cambio, si se utiliza el cilindro grande de 6 - pulgadas, se hará caer el martillo 56 veces sobre cada capa.

Este método Standard T-99 tiene 4 subdivisiones: A, B, C y D. Los A y B corresponden a los materiales que pasan la malla No. 4, y los métodos C y D, a los suelos que pasan la malla de 3/4".

- b) Método AASHTO Standard T-180: Este método corresponde con algunas modificaciones, al conocido Standard Modificado o Proctor Modificado.

La diferencia fundamental entre este método y el anterior esta en el peso del martillo y la altura de caída. El martillo empleado en este es el de 10 libras

(4.5 kg) y la altura de caída es de 18 pulgadas - (45cm). En lugar de colocar el material en 3 capas se coloca en 5, de aproximadamente igual espesor. - Este método también tiene las cuatro subdivisiones A, B, C y D, con las mismas características. (Ref.29)

2.2.2 Pruebas en campo

Se utilizan para medir en la obra si se ha alcanzado el peso volumetrico especificado. Las mas comunes - son:

2.a) Medida Física de Peso y Volumen

2.b) Mediciones Nucleares.

2.c) Otros.

a) Medida Física de Peso y Volumen: El principal pro-

blema en cualquiera de los métodos existentes, radica en - medir la humedad para poder calcular el peso volumétrico suelto en función del peso volumétrico húmedo, que es el que se obtiene en las pruebas de campo.

Se puede calentar una parte del material hasta secarlo y por diferencia se obtiene la humedad, pero este método es lento y peligroso porque en algunos suelos se altera el peso volumétrico con el calentamiento, debido a la evaporación de partes orgánicas principalmente.

La prueba física consiste en los siguientes casos:

- a.-1) Se excava un agujero de 10 a 15 cm de diámetro o un cuadrado de 15 cm por lado a la misma profundidad de la capa por probar.
- a.-2) El material excavado es cuidadosamente recogido y pesado. Se seca para determinar la humedad y el peso volumétrico seco.
- a.-3) El volumen del agujero es medido. El método usado generalmente es llenándolo con una arena de peso volumétrico constante que se tiene en un recipiente graduado.
- a.-4) Conocidos el peso seco de la muestra y el volu-

men del agujero, se calcula el peso volumétrico seco de la muestra, que debe ser igual o mayor que el peso volumétrico seco especificado.

b) Prueba de Medición Nuclear. (Fig. 15)

Se realiza por medio de un aparato nuclear medidor de densidades y humedades, que da los resultados al minuto, y no hay necesidad de hacer las pruebas destructivas descritas en el inciso anterior.

Este aparato se ha ido perfeccionando poco a poco, a tal grado de que en los Estados Unidos casi ya no se utiliza la medida física de peso y volumen.

Según la firma Seaman Nuclear Co. de Milwaukee, -- que es la que fabrica estos aparatos, se determina rápidamente por medio de ellos el mínimo de pasadas requerido para alcanzar la densidad especificada, la cantidad de balastro necesaria y el método óptimo que en algunos casos, puede dividirse en varias etapas con la aplicación del DÚO-FACTOR que también fabrica esta firma. Según esto, en ocasiones es necesario dar 2 ó 3 pasadas concentrando toda la carga disponible en el eje con llantas neu

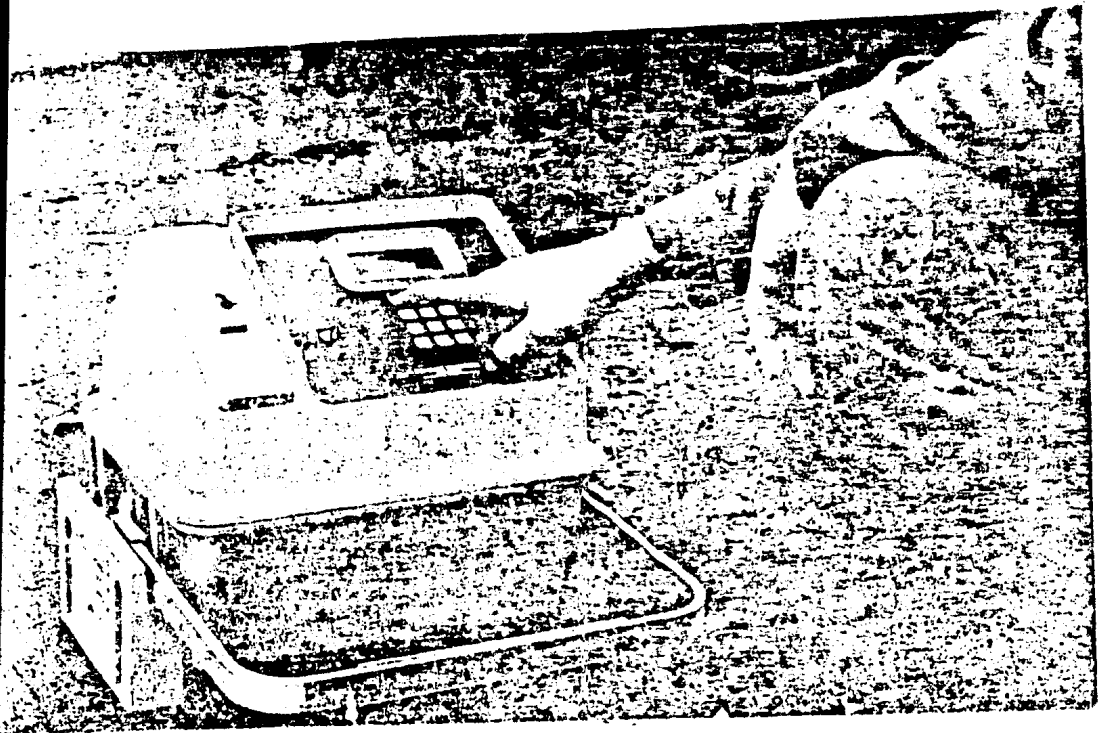


Fig. 15 Medidor Nuclear
de densidades y humedades.

máticas y al llegar a determinado valor de la densidad, es conveniente ir cambiando la carga hacia el rodillo metálico, hasta terminar a veces en una repartición de 50 y 50 y en otros con el 100% de la presión disponible concentrada en el rodillo de acero.

El principio de medición del aparato nuclear es el siguiente: Una fuente encapsulada muy pequeña de radioberilio del orden de 4.5 millicuries, emite rayos gamma hacia el material que se está investigando; al chocar - estos rayos con los átomos del material (arena, arcilla, limo, grava, etc.) son reflejados hacia un detector (diodo) que está relacionado con un medidor de tiempo de extraordinaria precisión, ver Figura (16). Al obtenerse la cifra de los rayos reflejados a una tabla elaborada específicamente para cada medidor, muestra el correspondiente valor del peso volumétrico del material investigado.

Este aparato evita la pérdida de tiempo y rastros de otras puebas.

c) Otras Pruebas: Como el problema principal es la determinación de la humedad, se han desarrollado últimamente algunos métodos entre los que destaca principalmente el denominado "Speedy" (fig. 17) que consiste en colocar un peso conocido de suelo mezclado con carburo de calcio dentro de un recipiente hermético provisto de un manómetro. El carburo reacciona con la humedad del suelo, produciendo gas acetileno y por lo tanto una presión que es registrada en el manómetro, el que se puede inclusive graduar en gramos de agua, obteniéndose rápidamente de esta manera el porcentaje de humedad y así poder calcular el peso volumétrico seco.

Otro método rápido es el de Helf, propuesto por él mismo, y su ventaja es que puede llegar a conocerse en el término aproximado de una hora el grado de compactación alcanzado, de un modo preciso.

Esto se logra porque el método no requiere el conocimiento del contenido de agua de la muestra obtenida para fines de control. El mismo Helf sugiere un método rápido para el control del contenido de agua en el campo - que, si no totalmente riguroso, resulta suficientemente aproximado y supera a los tradicionales, a juicio de su -

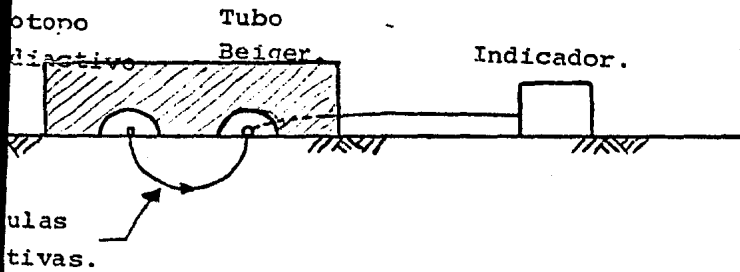


Fig. 16 Prueba de medición Nuclear.

Fuente 1.

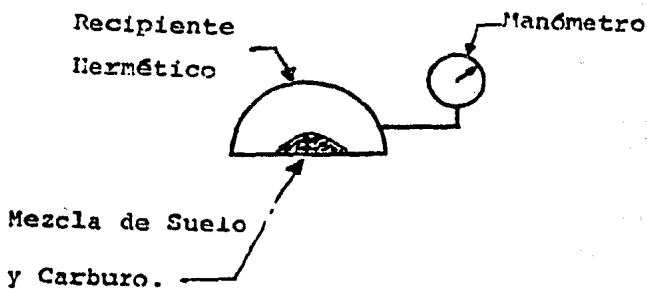


Fig. 17 Prueba de "Speedy".

Fuente (1).

autor, sobre todo porque las pruebas que se hacen se -- efectúan directamente sobre el material objeto del control, con lo que se toman en cuenta heterogeneidades en la obra; esta misma ventaja está presente en el método-propuesto para controlar la compactación.

2.3. Métodos de Proyecto y Progresivo.

Una vez descritas las pruebas de compactación, tenemos la información suficiente para conocer los métodos actuales de compactación.

a) Método de Proyecto. - En este método, la tierra se coloca sobre la superficie requerida en capas cuya variación es de 30 a 60 cm. y en ocasiones más gruesas. A continuación, se efectúa la compactación, pero como un proyecto separado por varios tipos de equipo y continuidad, hasta que se aprueba y el tramo queda listo para recibir la siguiente capa de tierra. La desventaja de este tipo de construcción, es que rara vez rinde uniformidad en lo que respecta a la densidad de la parte superior con la inferior y es costosa sobre la base del metro cúbico. Por ejemplo, si el grado de compactación especificado en proyecto es un 95% de Proctor modificada, es muy posible que

con el método de proyecto se dé este porcentaje sólo en la superficie o cerca de ella, y en el fondo probablemente habrá un 90% dependiendo del espesor de capa. Estos resultados dieron margen a que se creará una especificación límite de 20 cm. en el grueso de las capas en la mayoría de los proyectos de construcción actuales. Algunos contratistas dieron un paso más adelante y ya reducen voluntariamente la capa a 12 cm. porque aprendieron que esta reducción se traduce su producción en metros cúbicos por escrapas por día.

b) Método Progresivo. -En este método la compactación sigue inmediatamente al equipo que mueve la tierra y a medida que se va tirando en capas delgadas. Se basa en que la pulverización del material, obtenida por el equipo de acarreo, volteo, buldozeo y nivelación, seguida inmediatamente por el equipo compactador, requiere mucho menor tiempo de compactación. La uniformidad del espesor del material reduce al trabajo de compactación a 2 ó 3 pasadas cuando se usa equipo con llantas neumáticas y rodillo de acero. Esto reduce las horas de planchado y deja el área de terraplén lista para la siguiente capa con un mínimo de congestión de tráfico. El método facilita además el escurrimiento de agua superficial y permite reanudar las operaciones lo más pronto después de la lluvia.

CAPITULO III.

COMPACTACION POR CAPAS DELGADAS.

3.1 Consideraciones Generales.

Se consideran capas delgadas para este efecto las comprendidas entre 10 y 15 centímetros. (4 a 6 pulgadas).

Se llama método progresivo al que se lleva a cabo compactando en capas delgadas, cualquiera que sea el equipo o la combinación de ellos, que se utilice, siempre y cuando la compactación se realice inmediatamente después del tiro y desparrame del material.

La compactación por capas delgadas se ha visto que funciona tanto para material arcilloso y limoso, como para arenas, las cuales se han compactado con mucho éxito en capas de 8 a 10 cms, hasta las densidades requeridas por varios métodos.

Es necesario el uso de un medidor nuclear o algún método rápido para ejecutar las pruebas de campo, y así determinar prontamente el mínimo de pasadas requeridas para alcanzar la densidad especificada, pues generalmente una empresa contratista realiza el trabajo de compactación y la parte contratante controla los resultados para verificar el cumplimiento de las condiciones de proyecto; de manera que para -

calcular el grado de compactación, los métodos tradicionales exigen al menos 24 horas, y entonces el contratista ya ha compactado otras capas sobre aquella cuya calidad se controla cuando el contratante todavía no obtiene los resultados.

El método progresivo se lleva a cabo de la mejor manera, usando el equipo mas moderno que existe, como la compactadora DUO-FACTOR, las motoescrepas y la medición nuclear, por lo que siempre se podrá aplicar aquí en nuestro país, aunque el equipo nuclear sea de importación, su costo es muy accesible. Sin embargo, el método se puede realizar también con equipo menos eficiente.

3.2 Ventajas en el Uso de Cajas Delgadas. (10 a 15 cm).

- 1.- El equipo se mueve mas rápido en superficies firmes y suaves.
- 2.- Las escrepas, al no reducir su velocidad, pueden descargar mas rápido, incrementando así el rendimiento horario.
- 3.- Las escrepas y vagones o camiones pueden volcar cargas sin ayuda de un factor empujador adicional.

- 4.- Las capas delgadas disminuyen los tiempos de buldozeo y nivelación.
- 5.- Las capas delgadas se colocan y compactan en menos tiempo por metro cúbico.
- 6.- Las capas delgadas dan uniformidad, densidad y - valor de soporte.
- 7.- Producen mejor distribución de diferentes clases de material acarreados desde el banco de préstamo.
- 8.- Dejan más espacio para las operaciones de volcado y extendido.
- 9.- Reducen el costo del mantenimiento del equipo.
- 10.- Se mueve más tierra, y se construyen mejores pendientes.
- 11.- Facilita el escurrimiento de agua superficial y - permite reanudar las operaciones lo más pronto, - después de una lluvia.

CAPITULO IV

ESTUDIO ECONOMICO.

Aunque se dice que el costo de la compactación es muy reducido en comparación con el costo total de una obra, no se puede generalizar ya que un camino mal compactado, por ejemplo provoca que éste necesite un mantenimiento constante, y al pasar el tiempo resulte más caro no haber realizado una compactación adecuada.

Las principales variables que intervienen en los costos de una compactación son los siguientes:

- Tipo de suelo a compactar (Granulometría).
- Contenido de Humedad del suelo.
- Presión de Contacto del equipo hacia el suelo.
- Número de Pasadas del equipo.
- Espesor de Capa.
- Velocidad del equipo.
- Tamaño de la Obra.

- Costo-Horario del equipo.
- Producción Horaria del Equipo.
- Requerimientos Especiales.

La compactación más económica desde luego dependerá de como sepamos combinar estas variables para que el resultado sea el óptimo.

Dentro del último punto, - requerimientos especiales- se deberán contemplar puntos tan importantes como el de considerar que para la construcción pesada, la inversión de equipo en nuestro país resulta costosa, pues desafortunadamente no contamos con la maquinaria para construir todo el equipo necesario, lo que da por resultado que difícilmente se pueda conseguir este, sobre todo en épocas de inflación como la actual, en que se necesitan actualizar precios al menos cada mes en el ramo de la construcción. Esta demostrado por ejemplo, en la referencia (18) que para un movimiento de tierra la distancia de 1200 metros, a precios de mayo de 1983, resulta mas económico usar un tractor, 2 cargadores y 10 camiones de volteo, que realizar el mismo movimiento de tierras solo con 2 motoescrepas tra-

bajando a tiro y empuje. Esto porque las motoescrepas son importadas, lo que provoca que el costo- horario del equipo aumente considerablemente.

Todas las variables anteriores las podemos englobar en sólo 2 de ellas, por medio de la conocida fórmula del costo por metro cúbico.

$$\text{Costo por m}^3 = \frac{\text{Costo-Horario del Equipo}}{\text{Producción Horaria}}$$

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

Cargos Fijos:

- Depreciación
- Intereses
- Seguros
- Almacenaje

- Mantenimiento

Consumos:

- Combustibles

- Lubricantes

- Llantas

Operación

Transporte

Es decir que: **COSTO HORARIO = Cargos Fijos + Consumos + Operación + Transporte.**

El cálculo de la producción horaria, involucra a todas las demás variables citadas al principio del capítulo, ya sea directa o indirectamente por medio de la siguiente fórmula:

$$R = \frac{(A) (C) (V) (1000) (E)}{N}$$

En donde:

R= Rendimiento (m³/hr).

A= Ancho del rodillo compactador (metros)

C= Espesor de la capa (metros compactados)

V= Velocidad del equipo compactador (Km/hr)

N= Número de pasadas del rodillo para dar -
el porcentaje de compactación pedido -
(ver figura 18).

E= Eficiencia en el manejo de la máquina

1000=Factor de conversión de unidades

La eficiencia (E) afecta al rendimiento teórico, reduciéndolo debido a los Traslapes de pasadas paralelas del rodillo, por el tiempo perdido para dar vuelta, y otros factores.

La relación que existe entre el rendimiento, el número de pasadas del equipo y el espesor de capa, se puede

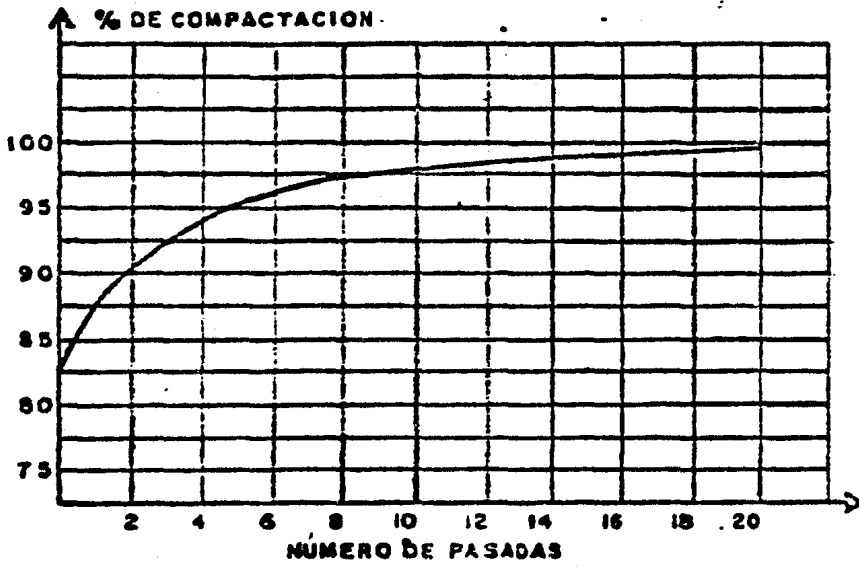


Figura 18.

preciar en la gráfica de la figura (19), en la que esta última permanece constante.

Ya que el presente trabajo es un estudio de la conveniencia de compactar por capas delgadas, podemos transformar la fórmula anterior a:

$$K = \frac{CV}{Rn}$$

Esto: Si A, E y 1000 son constantes, (K) es decir, para cuando se usa la misma máquina.

Con esta fórmula, y, haciendo constante el espesor de capa C, se puede dibujar la gráfica de la figura (19).

Las relaciones entre las 4 variables anteriores se pueden observar relacionando el espesor de capa C con las presiones que el compactador ejerce al suelo.

Si recordamos la física elemental tenemos:

$$\text{Presión} = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Area}}$$

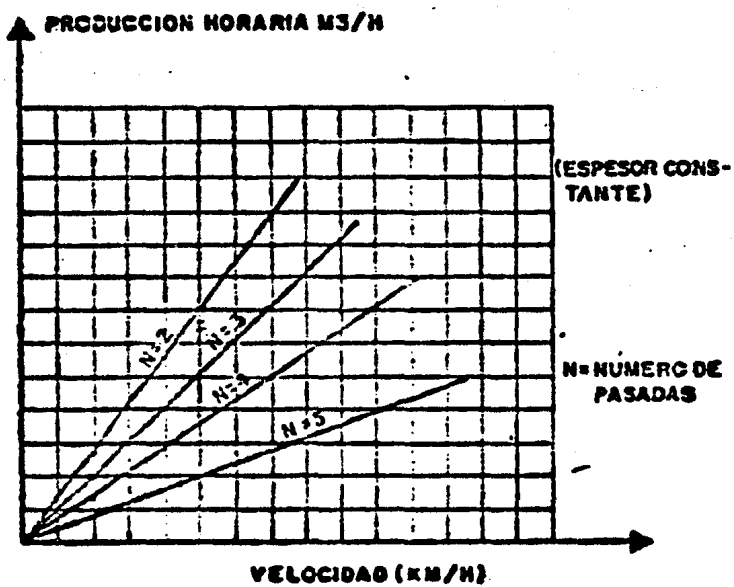


Fig. 19

Considerando una placa rígida circular de área "A", colocada sobre el suelo, (VER FIGURA 20) a la que se aplica una carga "L" y una presión de contacto "p" y aplicando la teoría de BOUSSINESQ se tiene que:

El bulbo de presiones, suponiéndolo circular, tendrá un área de:

$$A = 3.1416 C^2$$

Entonces la presión de contacto será:

$$P = \frac{L}{3.1416 C^2}$$

$$C = \frac{L}{3.1416 P}$$

Los bulbos de presión se obtienen uniendo los puntos del suelo que tienen la misma presión.

Viendo las figuras (20, 21 y 22) se llega a los siguientes puntos:

a) Si aumenta el tamaño (área A) de la placa, pero la --

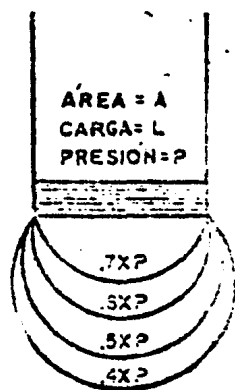


Fig. 20

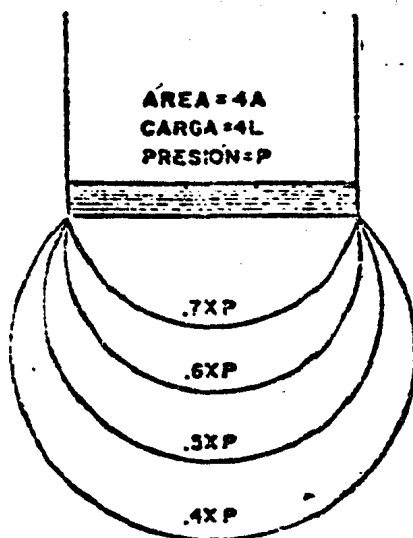


Fig. 21

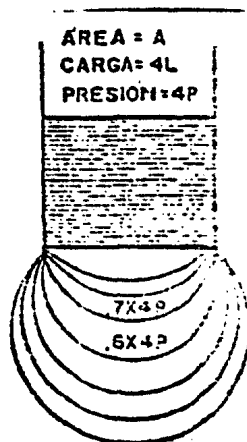


Fig. 22

presión permanece constante incrementando la carga L , la profundidad del bulbo de presión aumenta. (fig. 21)

- b) Si aumenta la presión P y el área A permanece constante (fig. 22), la profundidad del bulbo no aumenta significativamente por la presión por lo tanto -- la energía de compactación, sí aumentan.

Si consideramos un cierto equipo de compactación, trabajando capas de un determinado espesor:

De a) y b) se deduce que es necesario controlar el espesor de las capas, para obtener suficiente presión en el suelo y conseguir la compactación deseada.

De a) se deduce para aumentar el espesor de la capa, - debemos cambiar el equipo por otro que tenga mayor superficie de contacto, aunque la presión permanezca constante.

La teoría de los bulbos de presión Boussinesq, fue desarrollada por éste para un medio elástico. Sin embargo para fines prácticos, todos los suelos son elásticos y la teoría es razonablemente cierta aún para suelos granulares.

De b) se deduce que no podemos aumentar significativamente el espesor de la capa de compactación simplemente -- lastrando excesivamente el equipo.

Las capas gruesas en contacto con las llantas del equipo de descarga, originan que estas sean lentas, y si se trata de una escrepa, a menudo requiere un tractor empujador - en el terraplen. Por el contrario, capas delgadas y compactadas permiten cargar a las mayores velocidades de tránsito y consecuentemente se obtienen mayores viajes por día. Espesores de 8 a 10 cms. pueden ser compactados con una sola pasada de equipos compactadores con llantas de rodillo de acero a velocidades hasta de 17 Km. por hora, manteniendo el area lisa y firme, eliminando rodadas profundas que ademas de presentar mal aspecto, no permiten el rápido tránsito ni de las escrepas o camiones, ni de los compactadores.

En un ejemplo práctico (referencia 25) se vio que un contratista principió la nivelación de un centro comercial utilizando el "metodo de proyecto" para la compactación, tirando capas de 20 cm. de espesor. El contratista cambió al "método progresivo" y su producción aumento casi un 50% de metros cubicos por hora. La compañía utilizó el mismo número de tractores y escrepas, pero redujo las capas a solamente 12.7 cm.

El material era arcilloso y muy humedo, por lo que requería cambiar a primera velocidad para descargar. Después de buldozear, nivelar y dar 2 pasadas de planchado neumático, una ligera y otra pesada, las escrepas fueron capaces de descargar a velocidades mucho mas altas. Esto se tradujo en más cargas por hora.

La compactación ligera y pesada fue necesaria en este proyecto porque el material humedo no soportaba un compactador cargado mientras estaba suelto. Es conveniente tomar en cuenta que las cargas por rueda que exceden el valor de soporte del material -que es muy bajo cuando esta suelto- no producen compactación ni estabilización, ya que como se menciona antes, producen fricción interna en las partículas de suelo.

Una vez que se paso al compactador ligero, el segundo compactador fue balastado hasta una carga de 300 libras por rueda con llantas de 7.50 x 15 con espaciamiento muy angosto, lo cual rendia un 90% de Proctor standar.

Ejemplo:

Un compactador Caterpillar 825 de pison autopropulsado.

de alta velocidad trabajó en una obra con las siguientes características:

Espesor de capa $C = 0.20$ m.

Número de pesadas $N = 3$.

Rendimiento $R = 1130$ m³/hr.

Velocidad $V = 10$ Km/hr.

Antes de terminar, cambió el espesor de capa a 0.127m. con lo cual su velocidad pudo aumentar a 15 km/hr y fue suficiente con 2 pasadas. Indicar el número rendimiento.

Al cambiar el método progresivo, su rendimiento fue:

$$\frac{C1V1}{R1N1} = K$$

$$\frac{0.20 (10)}{1130 (3)} = 5.89 \times 10^{-4}$$

$$\frac{C2V2}{R2N2} = 5.89 \times 10^{-4}$$

$$\frac{0.127 (15)}{R2 (2)} = 5.89 \times 10^{-4}$$

$$R2 = 1615 \text{ m}^3/\text{hr.}$$

CONCLUSIONES.

- A.- El término compactación se usa para indicar la reducción de vacíos en un suelo, más ó menos rápida, producida por medios mecánicos durante el proceso de construcción y se diferencia de la consolidación porque ésta implica la reducción de vacíos relativamente lenta, debida a la aplicación de cargas estáticas, usualmente acompañadas de expulsión de agua del suelo; por ejemplo en el asentamiento de un edificio.
- B.- La compactación mejora las características de un suelo en lo que se refiere a resistencia mecánica; resistencia a los asentamientos bajo cargas futuras e impermeabilidad.
- Entre las obras que requieren compactación, se pueden señalar como más importantes: Las carreteras, las aeropistas y las presas de tierra.
- C.- El grado de compactación, es un concepto un tanto peligroso si no se maneja racionalmente. Muchos Ingenieros consideran como sinónimos el nivel de calidad de un suelo compactado y el grado de compactación correspondiente; es decir, suponen que a mayor porcentaje de compactación mejor nivel de calidad se alcanza. Puesto que la construcción de terraplenes ha ido evolucionando

a grandes pasos, y se requieren niveles de calidad más altos, se han fijado erróneamente normas y especificaciones muy rígidas, al extremo de estipular en forma--desmedida grados de compactación mínimos de 100 %.

D.- Los requisitos de compactación en el campo se basan -- sobre un peso específico seco de proyectos, obtenido - en pruebas de laboratorio realizadas sobre el suelo de que se trató . El equipo a usarse para lograr la com--compactación dependerá de tal valor de proyecto y del contenido de agua natural del suelo en los bancos de que se extraiga y además, del tipo de suelo en sí.

Teóricamente, el material habrá de compactarse con la - humedad óptima correspondiente al peso específico de--seado, obtenida en laboratorio. Para ello, a veces puede ser necesario añadir agua al material en el banco, - en tanto que otras veces será preciso secar éste, generalmente aireándolo un período de tiempo después de --extraído. Sin embargo, condiciones de clima pudieran--imponer restricciones muy serias respecto a la humedad del suelo por compactar en tales casos; la prueba de laboratorio que fije los datos de proyecto, deberá te--ner en cuenta tales restricciones y el equipo de campo trabajar sobre tales bases.

- E.- La máxima aproximación posible a la estructura de un suelo compactado en el campo se logra mediante compactación por amasado en el laboratorio. Esto se ha confirmado indirectamente por comparación de propiedades mecánicas, sobre todo resistencia y relaciones, esfuerzo, deformación de especímenes recién compactados en el campo y en el laboratorio. La compactación por impacto en laboratorios, menos apropiados en términos generales, puede considerarse aceptable, al menos para fines de control, dado que sus diferencias con respecto a la compactación de campo son del orden de las variaciones inevitables en la práctica.
- F.- Las capas más delgadas resultan ser más productivas -- cuando las especificaciones de compactación son elevadas, porque el procesado al buldozear y nivelar pulveriza mejor el material y requiere menos pasadas por metro cúbico para alcanzar las densidades requeridas.
- G.- En capas más gruesas se requiere más tiempo del equipo de compactación por metro cúbico, por lo que el buldozeo y la nivelación es menos efectiva. La pulverización de terrenos profundamente ahogados en material -- suelto es muy difícil.

Mover tierra en capas gruesas resulta más costoso, por que debe cambiarse la transmisión del tractor a baja-velocidad para descargar y repartir, llegándose en -- ocasiones al extremo de necesitarse tractores para -- descargar en el terraplén.

H.- Inclusive en suelos arenosos con finos poco plásticos, los rodillos neumáticos son los que rinden mejores resultados y actualmente su uso tiende a imponerse aún sobre los rodillos "pata de cabra". En estos suelos no existen grumos cuya disgregación requiera grandes concentraciones de presión como las que proporciona el rodillo "pata de cabra"; por ello resulta mejor la aplicación de presiones uniformes en áreas mayores que evitan inclusive, el producir zonas sobrefatigadas en el material compactado.

En limos poco plásticos, los rodillos neumáticos resultan también eficientes. Suelen usarse también -- los rodillos lisos y "pata de cabra" aunque con resultados un poco menos satisfactorios.

I.- Para obtener tiempos y rendimientos óptimos en cualquiera de los métodos vistos -progresivos ó de proyecto-, es aconsejable hacer pruebas en el tramo para en-

contrar el espesor de la capa que permita alcanzar el grado de densidad especificado con el mínimo número de pasadas del equipo disponible. Para esto se utiliza el "método de pista de prueba" (Strip---test Control) que se efectúa en un tramo de 20 metros de longitud, haciéndose pasar el compactador varias veces y mediando el peso volumétrico antes y después de cada pasada.

BIBLIOGRAFIA.

(REFERENCIAS)

- F.
- 1) --Alcázar Lozano, F. Diseño y Construcción de Pavimentos. Factores que afectan la compactación. Centro de Educación Continua, Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., México, 1977.
- 2) Arredondo y Verdu, F. et al., Compactación de Terrenos, Terraplenes y Pedraplenes. Editores Técnicos Asociados, S.A., España, 1971.
- 3) - Calderón Bazaldúa, F. Aspectos de la Técnica de Compactación en el Movimiento de Tierras, Facultad de Ingeniería, U.N.A.M, Tesis profesional de Ingeniería Civil, México, 1976.
- 4) - Flores Núñez J., y Auvinet, G.G. Comportamiento de la - Presa Madín Durante su Construcción y Primer Llenado, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C. México, 1979
- 5) - Gabay, A. & Zemp, J., Maquinas Para Obras. Editorial Blume, España, 1974.
- 6) - Juárez Badillo E. y Rico Rodríguez, A., Mecánica de Suelos, Tomos I y II, Editorial Limusa, México, 1978.

EF.

- 7) -- Luer Dorantes C., Movimientos de Tierras. "Equipo de Compactación", Centro de Educación Continua, Facultad de -- Ingeniería, U.N.A.M., México, 1974,
- 8) - Marsal, J. R., Compactación de Suelos Arcillosos, Instituto de Ingeniería, U.N.A.M. México, 1969.
- 9) - Marsal, J. R. y Reséndiz Núñez, D. Presas de Tierra y -- Enrocamiento, Editorial Limusa, S.A., México, 1979.
- 10) - Nichols, H.L., Moving The Earth. The Work Book Of Excavation, North Castle Books, U.S.A., 1962.
- 11) - Orozco, S. R. IX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos "Compactación y Control de Calidad". Tomo II, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C., México, 1978.
- 12) - Orozco S, R., Suelos Expansivos en Urbanización y Vivienda. Primera Reunión de Trabajo Infonavit - Instituto de Ingeniería., México, 1977.
- 13) - Ortiz Fernández, C. Principios Fundamentales de Compactación. Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., Tesis Profesional de Ingeniería Civil, México, 1974.

- F.
- 1) - Peurifoy L, R. Métodos, Planeamiento y Equipo de Construcción. Editorial Diana, S.A., México, 1978.
 - 2) - Ponce Serrano, A. Trabajo del Equipo de Compactación. Facultad Profesional de Ingeniería Civil, México, 1981.
 - 3) - Ramírez Rascón, A. Ejercicios Sobre el Comportamiento de los Suelos. Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., México, - 1978.
 - 4) - Ríos Lazcano, E. Terraplenes. "Compactación Especial", Volumen II, Primer Congreso Panamericano, México, 1960.
 - 5) - Rodríguez Melchor, H. Movimiento de Tierras con Motoescrepas. Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., Tesis Profesional de Ingeniería Civil., México, 1983.
 - 6) - Schulze, W. & Simmer, K. Cimentaciones. Editorial Blume, S.A., España, 1970.
 - 7) - Seaman J., H., The Case For Thin Lift Compaction. Engineering and Contract Record, U.S.A., 1981.

- (21)- Tamez González, E. Mécanica de Suelos Aplicada a la --
Construcción de Vías Terrestres. Escuela Nacional de -
Ingeniería, U.N.A.M., México, 1965.
- (22)- Terrón Sierra, S., Métodos Mecánicos de Pruebas de La-
boratorio en Compactación de Suelos para Vías Terrestres.
Facultad de Ingeniería, U.N.A.M. Tesis Profesional de In-
geniería Civil, México, 1970.
- (23)- Terzaghi, K. Soil Mechanics In Engineering Practice. John
Wiley & Sons, U.S.A., 1948.
- (24)- Zeevart, L. Mecanica de Suelos, Volumen II, Facultad de
Ingeniería, U.N.A.M., México, 1966.
- (25)- "Construcción Mexicana". Secretos de la Compactación, Re-
vista publicada por Novaro Internacional, México, Marzo-
de 1977.
- (26)- "Construcción Pan. Americana", Compactación de Suelos., Re-
vista publicada por International Publishing Co. U.S.A.
México, Enero de 1982.

REF.

- (27) - Nation Cooperative Higwar Research Program. Construction of Enbankments. U.S.A., 1976.
- (28) - U.N.A.M., Facultad de Ingeniería, Breve Descripción del Equipo Usual de Construcción. Apuntes del Curso de Construcción I, México, 1979.
- (29) - Valle Rodas Radl. Carreteras Calles y Aeropistas, El Ateneo. Buenos Aires, 1970.