

76
2ef



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

"TECNICAS DE COMPACTACION"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A ;
PEDRO RANGEL ESTRADA



DIRECTOR DE TESIS: ING. FEDERICO ALCARAZ LOZANO

MEXICO, D. F.

264076

1998.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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.

Dedicatorias

Esta tesis representa la culminación de una etapa muy importante de mi vida y quiero dedicarla con mucho respeto a todos los que me impulsaron para lograrlo.

A mis padres: Pedro Rangel Garcia y Elvira Estrada Prudencio, por haberme apoyado durante toda mi carrera.

A mi hijo, que día con día me impulsa a salir adelante.

A Emma Benicia Gervacio, mi gran amor su apoyo y gran comprensión.

A mis hermanos:

Leonardo Rangel Estrada
Javier Rangel Estrada
Jaime Rangel Estrada
Armando Rangel Estrada
Efrain Reyes Estrada
Nereida Rangel Estrada

por haber confiado en mi y brindarme su apoyo en las buenas y en las malas.

A mis tios Macario Estrada Prudencio y Cresenciana León, por sus consejos.

A mis primos Epimenio Estrada y Jose estrada, por su apoyo moral.

A mi gran amigo el Lic. Sergio Barajas Rodriguez, por su apoyo.

Al Lic Francisco Garduño Yañez, por el apoyo que me brindo durante la elaboración de esta tesis así como su confianza.

Agradecimientos

A mi director el Ingeniero Federico Alcaraz Lozano, por su apoyo y paciencia durante el desarrollo de la tesis.

Al Joven José Loredo Saucedo, por su colaboración.

Al Lic. Juan Manuel Barrera Cervantes por su apoyo moral.

A la facultad de Ingeniería de la U N A M, que en su momento fue mi segunda casa y que gracias a ella hoy veo concluido esta etapa.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-140/97

Señor
PEDRO RANGEL ESTRADA
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **ING. FEDERICO ALCARAZ LOZANO**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

"TECNICAS DE COMPACTACION"

INTRODUCCION

- I. PRINCIPIOS DE MECANICA DE SUELOS APLICABLES A LA COMPACTACION**
- II. EQUIPOS DE COMPACTACION**
- III. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA COMPACTACION**
- IV. SELECCIÓN DE COMPACTADORES**
- V. SOLUCION DE PROBLEMAS DE LA COMPACTACION**
- VI. RENDIMIENTO DEL EQUIPO DE COMPACTACION**
- VII. PLANEAMIENTO DE LA COMPACTACION EN UN TRAMO DE BASE PARA UN CAMINO**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria a 23 de febrero de 1998.
EL DIRECTOR


ING. JOSÉ MANUEL COVARRUBIAS SOLIS
JMCS/GMP*Imf

Indice

Introducción.	1
I.- Principios de mecánica de suelos de mecánica de suelos, aplicables a la compactación.	2
II.- Equipos de compactación.	40
III.- Factores que influyen en la compactación.	61
IV.- Selección de compactadores.	67
V.- Solución de problemas de la compactación.	71
VI.- Rendimiento del equipo de compactación.	77
VII.- Planeación de la compactación en un tramo de base para un camino.	81

Introducción

Con esta tesis se pretende proporcionar información sobre métodos y técnicas para que el estudiante de Ingeniería Civil, asimile los conocimientos básicos para entender con más claridad las variadas formas de compactación de un suelo, así, como su control y formas de ejecución.

El Ingeniero podrá conocer la naturaleza media, la composición, su estructura y otras propiedades del suelo, así como su campo probable de variación; por ello es posible reproducir en el laboratorio, con gran analogía, las condiciones aproximadas que prevalecerán en la estructura, y ensayar en estas condiciones los tipos de suelo que se emplearán en su ejecución.

Por otro lado cabe mencionar que la compactación de suelos, es una de las ramas de la ingeniería de mayor importancia que se debe estudiar con cuidado, ya que de ella depende la vida útil de las obras ejecutadas.

Debo mencionar que en este trabajo se ilustran diagramas lógicos ha seguir en la solución de problemas en la compactación de laboratorio.

La selección de equipos de compactación son otros de los factores principales para realizar una buena compactación, por lo que se le dedica un capítulo para su estudio como se verá más adelante.

En esta tesis se anexan las figuras y gráficas al final de cada capítulo.

Capítulo I.- Principios de mecánica de suelos, aplicados a la compactación.

I.1.- Clasificación de los suelos.

I.2.- Definición.

I.3.- Propósito e importancia.

I.4.- Pruebas de compactación en laboratorio.

I.4.a.- Prueba Proctor Estándar.

I.4.b.- Prueba Proctor Modificada.

I.4.c.- Prueba Porter.

I.5.- Métodos de control de Obra.

I.5.a.- Medida física de peso y volumen.

I.5.b.- Prueba de medición Nuclear.

I.5.c.- Otros.

I.6.- Trabajo del equipo de compactación.

I.7.- Energías de compactación.

I.7.a.- Compactación por presión Estática.

I.7.b.- Compactación por Impacto.

I.7.c.- Compactación por Vibración.

I.7.d.- Compactación por Amasamiento.

I.- Principios de mecánica de suelos, aplicados a la compactación.

La capacidad de carga de una carretera o de un relleno depende del Peso Volumétrico (PV) de los materiales con que fueron construidos. Al compactar cualquier suelo debemos tener en mente:

- 1.- ¿Que Peso Volumétrico se debe lograr?
- 2.- ¿Cómo puede lograrse?
- 3.- ¿Cómo podemos comprobar este Peso Volumétrico?

Antes de contestar estas preguntas debemos determinar el tipo de suelo y el contenido de humedad. Los suelos pueden ser divididos en la siguiente clasificación.

- A.- Suelos no compactables, como las turbas.
- B.- Suelos cohesivos, como arcillas y limos.
- C.- Suelos no cohesivos, tales como arenas y gravas.

En esta tesis solamente veremos los casos B y C que son los suelos mas usados en los trabajos de construcción, cada material, como veremos mas adelante tiene su propio Peso Volumétrico Máximo influenciado notablemente por el contenido de humedad.

De esto trataremos en este capítulo.

I.1.- Clasificación de los suelos

Desde el instante mismo en que las propiedades físicas de los suelos se tomaron en motivo de interés, se ha querido, con frecuencia, correlacionar los resultados de simples ensayos de clasificación con las constantes del suelo necesarias para resolver los problemas de la práctica. La mayoría de estas correlaciones se remiten a las características granulométricas. No obstante, los intentos para fundamentar sistemas de clasificación exclusivamente en la granulometría jamás han conducido a resultados satisfactorios. Así, por ejemplo, las tentativas efectuadas para determinar el coeficiente de permeabilidad de los suelos partiendo de los resultados del análisis mecánico han fracasado porque la permeabilidad depende, en gran parte, de la forma de los granos, la cual puede ser muy diferente aun para suelos que tengan granulometrías idénticas. Además, es generalmente más económico y más exacto realizar un ensayo de permeabilidad que efectuar un análisis mecánico.

Así mismo, se ha sostenido que la fricción interna de las arenas bien graduadas compactadas es mayor que la que corresponde a arenas uniformes en la misma condición. Si bien hay evidencias prácticas, por determinaciones efectuadas in situ, que indican que esta aseveración quizá sea correcta, hay que recordar que el ángulo, de fricción interna de una arena depende no solo de las características granulométricas sino también de la forma de los granos y de la rugosidad de sus superficies. Así por ejemplo, los ángulos de fricción interna de dos arenas

de granulometrías idénticas pueden ser muy diferentes. La verdad es que hasta el presente no se ha obtenido ninguna relación bien definida entre granulometría y ángulo de fricción interna. Los ensayos ejecutados para correlacionar las características granulométricas de los suelos finos, como los limos y las arcillas, con la fricción interna han sido aún menos felices.

A pesar de sus limitaciones, las clasificaciones de suelos basadas en las características granulométricas tiene amplio uso, especialmente para descripciones generales o preliminares.

Para poder clasificar los suelos nos basaremos en el "Sistema Unificado de Clasificación de Suelos"(S.U.C.S.).

La naturaleza poco satisfactoria de la mayoría de los sistemas de clasificación condujo a una revisión crítica del problema (A. Casagrande, 1948) y a la proposición del Sistema de Clasificación de Suelos, el que fue adoptada por el cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos, por el U. S. Bureau of Reclamation y subsecuentemente por muchas otras organizaciones de aquel país y del resto del mundo (U. S. B. R., 1948).

Según este sistema, los suelos se dividen en tres grupos principales: de grano grueso, de grano fino y altamente orgánico (suelos – turbas).

El sistema cubre los suelos gruesos y los finos, distinguiendo ambos por el cribado a través de la malla 200; las partículas gruesas son mayores que dicha malla y las finas, menores. 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.

Se describirán en primer lugar los diferentes grupos referentes a suelos gruesos.

I.- Suelos gruesos

El símbolo de cada grupo está formado por dos letras mayúsculas, que son las iniciales de los nombres ingleses de los suelos más típicos de ese grupo. El significado se especifica abajo.

- a) Gravas y suelos en que predominen éstas. Símbolo genérico G (gravel).
- b) Arenas y suelos arenosos. Símbolo genérico S (sand).

Las gravas y las arenas se separan con la malla No.4, de manera que un suelo pertenece al grupo genérico G, si más del 50 % de su fracción gruesa (retenida en la malla 200) no pasa la malla No.4, y es del grupo genérico S, en caso contrario.

Las gravas y las arenas se subdividen en:

- 1.- Material prácticamente limpio de finos, bien graduado. Símbolo W (well graded). En combinación con los símbolos genéricos, se obtienen los grupos GW y SW.
- 2.- Material prácticamente limpio de finos, mal graduado. Símbolo P (poorly graded). En combinación con los símbolos genéricos, da lugar a los grupos GP y SP.
- 3.- Material con cantidad apreciable de finos no plásticos. Símbolo M (del sueco mo y mjala). En combinación con los símbolos genéricos, da lugar a los grupos GM y SM.

- 4.- Material con cantidad apreciable de finos plásticos. Símbolo C (clay). En combinación con los símbolos genéricos, da lugar a los grupos GC y SC.

II.- Suelos finos

También en este caso el Sistema considera a los suelos agrupados, formándose el símbolo de cada grupo por dos letras mayúsculas, elegidas con un criterio similar al usado para los suelos gruesos, y dando lugar a las siguientes divisiones:

- a) Limos inorgánicos, de símbolo genérico M (del sueco mo y mjala).
- b) Arcillas inorgánicas, de símbolo genérico C (clay).
- c) Limos y arcillas orgánicas, de símbolo genérico O (organic).

Cada uno de estos tres tipos de suelos se subdividen, según su límite líquido, en dos grupos. Si éste es menor de 50 %, es decir, si son suelos de compresibilidad baja o media, se añade al símbolo genérico la letra L (low compressibility), obteniéndose por esta combinación los grupos ML, CL y OL. Los suelos finos con límite líquido mayor de 50 %, o sea de alta compresibilidad, tras el símbolo genérico la letra H (high compressibility), teniéndose así los grupos MH, CH y OH.

Los suelos altamente orgánicos, usualmente fibrosos, tales como turbas y suelos pantanosos, extremadamente compresibles, forman un grupo independiente de símbolo Pt (del inglés peat; turba).

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

Los materiales cohesivos son arcillas y limos arcillosos; cohesión podemos definirla como la atracción mutua de las partículas de un suelo debido a fuerzas moleculares y a la presencia de humedad.

A continuación se muestran las tablas generales del "Sistema Unificado de Clasificación de Suelos" (tabla I. a y I. b).

Criterio de clasificación en el laboratorio			Símbolos del grupo	
Suelos de partículas gruesas Más de la mitad del material es retenido en la malla No.200 (*) (Úsese la curva granulométrica para identificar las fracciones de Suelo)	Gravas Más de la mitad de la fracción gruesa pasas es retenida en la malla No.4 (Úsese la curva granulométrica para identificar las fracciones de suelo)	Gravas limpias (Poco o nada d partículas finas)	GW	
		Gravas co (Cantidad apreciable d partículas finas)	GP	
		Gravas co (Cantidad apreciable d partículas finas)	GM	
		Gravas finos (Cantidad apreciable d partículas finas)	GC	
		Arenas limpias (Poco o nada d partículas finas)	SW	
		Arenas limpias (Poco o nada d partículas finas)	SP	
	Arenas co Más de la mitad de la fracción gruesa la malla No.4 (Úsese la curva granulométrica para identificar las fracciones de Suelo)	Arenas co (Cantidad apreciable d partículas finas)	SM	
		Arenas co (Cantidad apreciable d partículas finas)	SC	
		Limos y Arcillas Limite líquido menor de 50	ML	Equivalencia de Símbolos G. grava, M. Limo, O. Suelos orgánicos, W. Bien graduados, L. Baj compresibilidad, S. Arena, C. Arcilla, Pt. Turba, P. Mal graduada, H. Alta compresibilidad.
			CL	
			OL	
		Limos y Arcillas Limite líquido mayor de 50	MH	Comparando suelos a igual limite líquido, la tenacidad y la resistencia en estado seco aumentan con el índice plástico.
CH				
OH				
Suelos altamente Orgánicos.			Pt	

Menos de 5 %: GW,GP,SP
Mas de 12 %: GW,GC,SM,SC

Determinense los porcentajes de grava y arena de la curv granulométrica dependiendo del porcentaje de finos (fracción qu pasa la malla No.200) los suelos gruesos se clasifican como siguen:

Coef. de Uniformidad (Cu) Coef. De Curvatura (Cc)

$Cu = D_{60} / D_{10}$, mayor de 4 $Cc = (D_{30})^2 / (D_{10} \cdot D_{60})$, entre 1 y 3

No satisfacen todos los requisitos d graduación para GW

Limites de plasticidad abajo de l línea "A" ó Ip menor que 6

Limites de plasticidad arriba de l línea "A" con Ip mayor que 6

$Cu = D_{60} / D_{10}$, mayor de 6 $Cc = (D_{30})^2 / (D_{10} \cdot D_{60})$, Entre 1 y 3

No satisfacen todos los requisito de graduación para SW

Limites de plasticidad debajo de l línea "A" ó Ip menor que 6

Limites de plasticidad arriba de l línea "A" con Ip mayor que 6

Carta de plasticidad para clasificación de suelos d partículas finas en el laboratorio.

Limite líquido

(*) Todos los tamaños de las mallas en esta carta son los us. Estándar

Tabla I. a

Procedimiento (excluyendo las partículas mayores de 7.6 cm. (3") y basando las fracciones en pesos estimados)		Símbolos del grupo			Nombres típicos		Información necesaria para la descripción de los suelos		
Suelos de partículas gruesas Más de la mitad del material es retenido en la malla No.200 (60). Para clasificación visual puede usarse 1/2 cm como equivalente a la abertura de la malla No.4	Gravas Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida en la malla No.4	Gravas limpias (poco o nada de partículas finas).	Amplia gama en los tamaños de las partículas y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios.		GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos.	Dése el nombre típico; indiquense los porcentajes aproximados de grava y arena, tamaño máximo, angulosidad, características de la superficie y dureza de las partículas gruesas; nombre local y geológico; cualquier otra información descriptiva pertinente y el símbolo entre paréntesis. Para los suelos inalterados agréguese información sobre estratificación, compactación, cementación, condiciones de humedad y características de drenaje. Ejemplo: Arena limosa, con grava, como un 20 % de grava de partículas duras angulosas y de 15 cm. de tamaño máximo; arena gruesa a fina de partículas redondeadas a subangulosas, alrededor de 15 % de finos no plásticos de baja resistencia en estado seco, compacta y húmeda en lugar; arena arcillosa (SM).		
			Predominio de un tramo o un tipo de tamaños con ausencia de algunos tamaños intermedios.		GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos.			
	Gravas con finos (Cantidad apreciable de partículas finas).	Fracción fina poco o nada plástica (para identificación véase grupo ML abajo).		GM	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo.				
		Fracción fina plástica (para identificación véase grupo CL abajo).		GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla.				
	Arenas limpias (poco o nada de partículas finas).	Amplia gama en los tamaños de las partículas y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios.		SW	Arenas bien graduadas, arenas con grava con poco o nada de finos.				
		Promedio de un tamaño o un tipo de tamaños con ausencia de algunos tamaños intermedios.		SP	Arenas mal graduadas, arenas con grava con poco o nada de finos.				
	Arenas con finos (Cantidad apreciable de partículas finas).	Fracción fina poco o nada plástica (para identificación véase grupo ML abajo).		SM	Arena limosa, mezclas de arena y limo.				
		Fracción fina plástica (para identificación véase grupo CL abajo).		SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.				
	Suelos de partículas finas Más de la mitad del material pasa la malla No.200 (Las partículas de 0.075 mm. de diámetro)	Procedimientos de identificación en la fracción que pasa la malla No.4							
		Limosas y arcillas Límite líquido menor de 50	Resistencia en estado seco (características al rompimiento).	Dilatancia reacción al agitado	Tenaocidad (Consistencia a cerca del límite plástico).				
Nula o ligera			Rápida o lenta	Nula	ML	Limos inorgánicos polvo de roca, limos arenosos o arcillas ligeramente plásticos.	Dése el nombre típico, indiquense el grado y carácter de la plasticidad, cantidad y tamaño máximo de las partículas gruesas, color del suelo húmedo, olor, nombre local y geológico; cualquier otra información descriptiva pertinente y el símbolo entre paréntesis.		
Media a alta			Nula o muy lenta	Media	CL	Arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas			
Ligera a media			Lenta	Ligera	OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.			
Limosas y arcillas Límite líquido mayor de 50		Ligera a media	Lenta a nula	Ligera a media	MH	Limos inorgánicos, limos macaceos o disolmaceos, limos elásticos.	Para los suelos inalterados agréguese información sobre la estructura, estratificación, consistencia tanto en estado inalterado como remoldeado, condiciones de humedad y de drenaje.		
		Alta a muy alta	Nula	Alta	CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas.			
		Media alta	Nula a muy lenta	Ligera a media	OH	Arcillas orgánicas de media a alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.	Limo arcilloso, café, ligeramente plástico porcentaje reducido de arena fina; numerosos agujeros verticales de raíces. firme y seco en lugar; loess (ML).		
Suelos altamente orgánicos		Fácilmente identificables por color, olor, sensación esponjosa y frecuentemente por su textura fibrosa.			Pt	Turba y otros suelos altamente orgánicos.			

* Clasificaciones de frontera.- Los suelos que posean las características de dos grupos se designan con la combinación de los símbolos: Ejemplo GW-GC mezcla de grava

⊗ Todos los tamaños de las mallas en esta carta son los U. S. Estándar.

Tabla I. b

I.2.- Definición.

Para fines de esta tesis se deberá establecer una definición del vocablo "suelo" es un término del que hacen uso diferentes Profesionistas. La interpretación varía de acuerdo con sus respectivos intereses. Para el agrónomo, por ejemplo, la palabra se aplica a la parte superficial de la corteza capaz de sustentar vida vegetal en la que penetran las raíces de las plantas para tomar las sustancias necesarias para su existencia. Siendo esta interpretación demasiado restringida para el ingeniero. Para el geólogo es todo material intemperizado en el lugar en el que ahora se encuentra y con contenido de materia orgánica cerca de la superficie; esta definición peca de parcial en Ingeniería, al no tomar en cuenta los materiales transportados no intemperizados posteriormente a su transporte.

El concepto de los Ingenieros Civiles es más amplio, pues abarca todos los depósitos sueltos o moderadamente cohesivos como gravas, arenas, limos, arcillas o cualquiera de sus mezclas; o en otras palabras suelo es el resultado del proceso de desintegración de las rocas que forman la corteza terrestre. En esta tesis se empleará sólo en el sentido usado por los Ingenieros Civiles, tal y como se definió anteriormente.

I.3.- Propósito e Importancia

El propósito de la Compactación es estabilizar el suelo, especialmente en rellenos artificiales, terraplenes y presas, de modo que muestren un cambio mínimo en volumen o forma, bajo las influencias del tiempo y las condiciones climatológicas, y bajo el peso de estructuras, pavimento y tráfico.

La importancia de la Compactación de los suelos estriba en el aumento de la resistencia y disminución de capacidad de deformación que se obtiene al sujetar el suelo a técnicas convenientes que aumenten su peso específico seco, disminuyendo sus vacíos.

La Compactación mejora las características de un suelo en lo que se refiere a:

- a). - Resistencia mecánica
- b). - Resistencia a los asentamientos bajo cargas futuras (es consecuencia de la resistencia mecánica).
- c). - Impermeabilidad

Por lo general, las técnicas de Compactación se aplican a rellenos artificiales, tales como cortinas de presas de tierra, diques, terraplenes, para caminos y ferrocarriles, bordos de defensa, muelles, pavimentos, etc. Algunas veces se hace necesario compactar el terreno natural, como en el caso de cimentaciones sobre arenas sueltas. Estas estructuras deberán ser capaces de soportar su propio peso y el peso de las cargas super - impuestas, si falla, el costo de la reparación puede ser muy elevado.

Desde el punto de vista del constructor el problema es: "obtener la densidad especificada por el diseñador". Obtenida esta densidad se asegura que la resistencia a futuros asentamientos y la permeabilidad sean las supuestas por el diseñador, sin embargo, la obtención de la densidad de diseño no necesariamente asegura la resistencia mecánica supuesta, ya que esta depende, en muchos suelos, de la humedad a la cual fue compactado. Es necesario entonces que la Compactación sea efectuada a la humedad especificada, especialmente para suelos cohesivos.

Las investigaciones que realizó Terzaghi demostraron que ningún método de Compactación es igualmente adecuado para todos los tipos de suelos. Además, el grado de Compactación que alcanza un suelo dado, sometido a un procedimiento de Compactación también dado, depende en gran parte del contenido de humedad del suelo, conocido como "Contenido óptimo de humedad".

Se hace notar que Compactar a mayores grados del especificado no es conveniente, pues un suelo muy compacto podrá, en general, absorber mucha agua si se dan las condiciones propicias y al hacerlo su resistencia podrá descender drásticamente, en tanto que ese mismo suelo inicialmente, podrá resultar mucho más estable ante el agua manteniendo en el tiempo una resistencia inicialmente menor que la del otro, pero probablemente suficiente.

Por lo general, la compactación resulta ser un proceso de objetivos múltiples y ello propicia la complicación, pero, en segundo lugar, es evidente que muchos de estos objetivos serán contradictorios en muchos problemas concretos, en el sentido de que las acciones que se emprendan para cumplir con uno pudieran perjudicar a algún otro.

Las fallas de algunas obras han obligado a que las especificaciones de Compactación sean cada vez más estrictas.

1.4.- Pruebas de Compactación en Laboratorio

Históricamente los procesos de Compactación comenzaron a desarrollarse en el campo, como técnicas de construcción. Fue hasta que se trató de estudiar de un modo más riguroso los efectos de tales técnicas y de establecer procedimientos de control de calidad y verificación de resultados en el campo cuando nacieron las pruebas de Compactación de laboratorio.

Actualmente existen muchos métodos para reproducir, al menos teóricamente, en el laboratorio unas condiciones dadas de Compactación de campo. Todos ellos pensados para estudiar, además, los distintos factores que gobiernan la Compactación de los suelos.

En rigor, actualmente se hacen dos usos principales de las pruebas de compactación de laboratorio. En el primero, se compactan los suelos para obtener datos para proyecto de estructuras de tierra; esta información se refiere a resistencia, deformabilidad, permeabilidad, susceptibilidad al agrietamiento, etc. Pero hay un segundo uso, que es el que de ellas se hace en las operaciones de control de calidad; en este caso, la prueba funciona fundamentalmente como un índice comparativo del peso volumétrico del laboratorio y de campo y la similitud de propiedades mecánicas entre ambos es mucho menos importante, siendo la prueba de Peso Volumétrico representativa de las demás propiedades.

A partir de 1933, en que Proctor desarrolló su prueba, la primera históricamente, han ido apareciendo otras muchas; todas ellas pueden agruparse en uno de los siguientes apartados:

- 1) Pruebas Dinámicas
- 2) Pruebas Estáticas
- 3) Pruebas por Amasado
- 4) Pruebas por Vibración
- 5) Pruebas especiales o en proceso de desarrollo.

El objetivo de las pruebas que se describen en este capítulo, es conocer las características de los materiales y elementos estructurales que se emplean en la construcción de las obras antes mencionadas, para lo cual se determinan una curva humedad - densidad comparable a la que le corresponde al mismo material cuando se compacta en el terreno por medio del equipo y procedimiento que se pretende utilizar.

Si el propósito de la compactación es mejorar la resistencia mecánica y la impermeabilidad, sería ideal poder medir la resistencia del suelo y la impermeabilidad, para determinar cuando se ha alcanzado la resistencia y la impermeabilidad necesaria; pero el equipo para medir la resistencia (especialmente a esfuerzos de compactación y cortante) es difícil de manejar, es caro y no es aplicable a todos los suelos, por lo tanto se han ideado las siguientes pruebas de laboratorio las cuales se detallarán en este capítulo.

I.4.a.-Proctor Estándar

I.4.b.-Proctor Modificada

I.4.c.-Porter

I.4.a. - Prueba Proctor Estándar: Históricamente, el primer método, en el sentido de la técnica actual, es él debido a R.R. Proctor y es conocido hoy día como Prueba Proctor Estándar ó A.A.S.H.O. (American Association of State Highway Officials) Estándar. Esta prueba es aplicable a todos los suelos finos cuyas partículas pasen totalmente la malla No. 4 (4.76 mm.) o sea arena y suelos finos (limos y arcillas), con un 10 % máximo de retenido en esta malla pero pasando totalmente la malla de 3/8 pulg. (9.52 mm.), y que además estén dotados de cementación (ver figura I.a.) página 29.

Proctor desarrolló este ensayo en 1933, con motivo de la construcción de unas presas de tierra en California, Proctor estableció que hay una correspondencia entre el peso volumétrico seco de un suelo compactado y su resistencia.

El equipo para hacer pruebas de compactación en la obra es un equipo económico y sencillo, que consiste en:

Equipo para la Prueba

- Un molde Estándar de 4" (10.16 cm.) de diámetro por 4 1/2" (11.43 cm.) de altura, que tiene una capacidad de 0.944 m³. (1/30 pié³).
- Un pisón Estándar, de operación manual, de sección Circular, de 5.08 cm. De diámetro y con un peso de 2.5 kg.
- Guía metálica para el pisón.
- Una balanza de laboratorio con sensibilidad de 5 g.
- Una balanza de laboratorio con sensibilidad de 0.1 g.
- Horno secador
- Regla recta metálica
- Malla del No.4
- Equipo diverso, como espátulas, vidrios de reloj, etc.

Método de Prueba

- Se toman, por cuarteos, aproximadamente 3 kg. del material que pasa la malla No.4 y se disgrega perfectamente.
- Se agrega una cierta cantidad de agua y se revuelve cuidadosamente el material
- Se determina la tara del molde Proctor.
- El material se colocará dentro del molde, en el número de capas establecido y compactando cada capa con la cantidad de golpes prefijada.
- Una vez procesada la última capa, la cual deberá sobrepasar la altura del molde, se retira la extensión, se enrasa y se determina el peso del molde con el material compactado y se calculará el peso de la muestra húmeda W_m que será:

$$W_m = (\text{peso del molde Proctor conteniendo al suelo compactado}) - (\text{tara del molde})$$

$$\text{o sea } W_m = W_s + W_w; (\text{peso sólidos} + \text{peso del agua})$$

- De esta manera el peso volumétrico húmedo PV_m de la muestra se establece como:

$$PV_m = W_m / V_m$$

$$\text{en la que } V_m = 944 \text{ cm}^3.$$

- Retírese el suelo del molde y obténgase el contenido de humedad W de una muestra representativa, de unos 100 gr; aproximadamente, como se indica:

a.- Se determina la tara de la cápsula que se empleará, P_c

b.- Se pesa la cápsula conteniendo la muestra húmeda, $P(c + m)$

- c.- El peso húmedo de esta muestra es $P_w = P(c + m) - P_c$
 d.- Para determinar el peso seco de esta muestra, se seca en horno la cápsula conteniendo al suelo húmedo. Enseguida se pesa para tener: $P'(c + m)$ que es el peso de la cápsula conteniendo la muestra seca.
 e.- El peso seco de la muestra es: $P_s = P'(c + m) - P_c$
 f.- Entonces el contenido de humedad W será:

$$W = [(P_w - P_s) / P_s] * 100 \quad \text{en \% del peso de la muestra seca.}$$

- g.- Finalmente se obtiene el peso volumétrico seco, o sea

$$P_{Vd} = P_{Vm} / (1 + W/100)$$

La prueba se repite varias veces, variando cada vez el grado de humedad, con lo que se obtienen pares de valores humedad - peso volumétrico seco.

W%	$P_{Vd} = (S_s * P_{Vo}) / (1 + ((S_s * W) / G_w))$
13.53	1950 Kg./m ³ .
15.46	1880 "
16.95	1830 "
20.20	1720 "
22.36	1660 "

Tabla I. c

Con estos pares de valores se dibuja la gráfica I. a. página 37.

Puede observarse que hay un cierto contenido de humedad para el cual el peso volumétrico es máximo, este peso se conoce como: "Peso Volumétrico Seco Máximo" (P.V.S.M.), o Peso Próctor, y el contenido de humedad como humedad Óptima.

El diseñador entonces especifica el porcentaje del peso Próctor que debe obtenerse en la construcción del terraplén y la humedad Óptima (H. O.).

Por ejemplo: Si el proyectista especifica 95% Próctor en el caso de la gráfica, tenemos: $P.V.S.M = 1820 \text{ Kg/m}^3$

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

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

La razón de la existencia de un peso volumétrico máximo es que a todos los suelos, al incrementarse su humedad, se les proporciona un medio lubricante entre sus partículas que permiten un cierto acomodo de estas cuando se sujetan a un cierto trabajo de compactación. Si

se sigue aumentando la humedad, con el mismo trabajo de compactación se llega a obtener un mejor acomodo de sus partículas y en consecuencia un mayor peso volumétrico, 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.

Por lo tanto, si se aumenta o disminuye la humedad será necesario aumentar el trabajo del equipo de compactación, lo que, en general, no es económico.

La energía específica de compactación se calcula con la expresión:

$$E_c = (N * n * P * h) / V$$

en donde:

E_c = Energía Específica, en Kg.cm/cm³

N = Número de golpes por capa, 25

n = Número de capas de suelo, 3

P = Peso del pisón, 2.5 Kg

h = Altura de caída libre del pisón, 30.5 Kg

V = Volumen del suelo compactado, 944 cm³

Con estos datos Proctor obtuvo una Energía Específica de:

$$E_c = (25 * 3 * 2.5 * 30.5) / 944 = 6.05 \text{ Kg.cm/cm}^3$$

Los datos que determinan la Energía Específica en la prueba, fueron establecidos originalmente por Próctor como los adecuados para reproducir los pesos específicos secos que podían lograrse económicamente (es decir, con un número moderado de pasadas) con el equipo comercialmente disponible en aquella época.

1.4.b.- Próctor Modificada: Conforme fueron aumentando las cargas sobre las terracerías, por el uso de camiones y aeroplanos cada vez más pesados y con mayores frecuencias de tránsito, se vio la necesidad de desarrollar mayores densidades y resistencias en muchos materiales usando mayor trabajo de compactación. Por esta razón se desarrolló la prueba Próctor Modificada, y nuevos equipos y técnicas de compactación (ver figura 1. a) página 29.

Para esta prueba se usa el mismo cilindro Próctor Estándar, pero el material se compacta en 5 capas con un martillo de 4.5 Kg. y cayendo de una altura de 46 cm, dando 25 golpes por capa.

El equipo para llevar a cabo esta prueba es la misma que se utiliza en la prueba Próctor Estándar.

Método de prueba: Se realiza de la misma forma que la anterior prueba.

La energía Especifica de compactación se calcula con la expresión:

$$E_c = (N * n * P * h) / V$$

E_c = Energía Específica, Kg.cm/cm³

N = Número de golpes por capa, 25 (no varía)

n = Número de capas del suelo, 5

P = Peso del pisón, 4.5 Kg

h = Altura de caída libre del pisón, 45.7 cm

V = Volumen del suelo compactado, 944 cm³ (no varía)

Valores que aplicados en la expresión anterior permiten obtener el valor de la energía Especifica, que es:

$$E_c = (25 * 5 * 4.5 * 45.7) / 944 = 27.23 \text{ Kg.cm/cm}^3$$

Consecuentemente el peso volumétrico máximo obtenido con esta mayor energía de compactación resultará mayor que el obtenido en la prueba Próctor Estándar y, por lo tanto, la nueva humedad óptima será ahora menor que el primer caso.

La gráfica siguiente es un ejemplo de la prueba Próctor y la prueba Próctor Modificada efectuadas en el mismo material (ver gráfica l. b) página 38.

Obsérvese en esta gráfica que aunque el trabajo de compactación se ha incrementado 4.5 veces, la densidad solamente se incrementó 9 %, y que la humedad óptima disminuyó 3 %. Esto es invariablemente cierto: al aumentar la energía de compactación disminuye la humedad óptima porque para una humedad dada y un peso volumétrico mayor, el agua comienza a ocupar el lugar de las partículas antes que en la prueba Próctor Estándar.

1.4.c. - Prueba Pórtor: Este método de prueba sirve para determinar el peso volumétrico seco máximo y la humedad óptima en suelos con partículas gruesas que se emplean en la construcción de terracerías; también se pueden efectuar en arenas y en materiales finos cuyo índice plástico sea menor de 6. El método consiste en preparar especímenes con material que pasa la malla de 25.4 milímetros (1"), a los que se agregan diferentes cantidades de agua y se compactan con carga estática (ver figura l. b) página 30, en la prensa Porter.

Equipo necesario

- Molde cilíndrico de compactación de 15.24 cm (6") de diámetro interior y 22.86 cm (9") de altura, incluyendo el collarín, provisto de una base con un dispositivo para sujetar el cilindro.
- Máquina de compresión con capacidad mínima de 30 toneladas y aproximación de 100 Kilogramos (Prueba Porter).
- Varilla metálica de 1.9 cm (3/4") de diámetro y 30 centímetros de longitud, con punta de bala.
- Placa circular para compactar, ligeramente menor que el diámetro interior del cilindro, con diámetro de 15 centímetros, que pueda sujetarse a la cabeza de aplicación de la carga.
- Malla U.S. Estándar de abertura cuadradas de 25.4 milímetros (1").
- Malla U.S. Estándar de aberturas cuadradas de 4.76 milímetros (No.4)
- Balanza con capacidad mínima de 10 kilogramos y aproximación de un gramo.
- Charolas.
- Equipo accesorio normal.

Procedimiento de ensaye

1. - Se toma una muestra del material a probar, de aproximadamente 16 Kg y se seca
2. - Se pasa por la malla de 1 pul. (25.4 mm), 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 paso la malla. Si el porcentaje retenido es mayor del 15 % se prepara, del material original, una muestra que pase la malla de 1 pulgada. y que sea retenida en la malla No.4, 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 agregara al material que pasó la malla de 1 pulgada; Con este nuevo material se procede a la prueba.
3. - De la muestra así preparada, se cuartea y se toman 6 kg. a los que se le incorpora una cantidad de agua conocida y se homogeneiza con el material.
4. - Con este material se llena, en 3 capas, un molde metálico de 15.24 cm de diámetro (6 pulg.), y 20.32 cm. de altura (8 pulg.), con una capacidad de 3704 cm³.y con el fondo perforado. Cada capa se pica 25 veces con una varilla de 1.58 cm. de diámetro (5/8 pulg.), y 30 cm. de longitud, con punta de bala.
5. - Sobre la última capa se coloca una placa circular ligeramente menor que el diámetro interior del cilindro y se mete el molde de una prensa de 30 toneladas.
6. - Se aplica la carga gradualmente de tal manera que en cinco minutos se alcance una presión de 140.6 kg/cm².la cual debe mantenerse durante un minuto, e inmediatamente se descarga en forma gradual durante un minuto. Si al llegar a la carga máxima no sé humedece la base del molde, la humedad ensayada es inferior a la óptima.

7. - Este proceso se repite con otros 6 kg. de material poniéndole la misma cantidad de agua más 80 cm³.y se repiten los pasos 4,5 y 6,aumentando cada vez 80 cm³.de agua, tantas veces hasta observar que la base del molde se humedece bajo la presión indicada.
8. - En este momento el suelo que está en el molde tiene un poco pasada la humedad óptima y por lo tanto, se desecha y se toma el inmediato anterior como tipo para determinarle su peso volumétrico seco máximo y su humedad óptima, que será la que tiene.

Cálculos

- a). - Determinación del Peso Volumétrico Húmedo, PVm

$$PVm = Wm / V$$

Wm = Peso total de la muestra húmeda y el molde.

- b). - Determinación de la humedad, W

$$W = (Ww - Ws) / Ws * 100$$

- c). - Determinación del Peso Volumétrico Seco, PVd

$$PVd = PVm / (1 + W / 100)$$

I.5.- Métodos de Control en Obra

En general, el proceso de compactación en el campo se controla verificando con relativa frecuencia la densidad y la humedad del suelo sujeto a compactación.

A continuación se exponen los procedimientos para llevar a cabo el control de la compactación en el lugar, es decir, los métodos para garantizar el cumplimiento de las normas de compactación establecidas por medio de las pruebas de laboratorio son idénticas y cualitativamente los factores que la afectan en el laboratorio tienen su equivalencia en el campo, por ejemplo número de pasadas. Como se sabe que una obra compactada se ajusta a los requerimientos de peso volumétrico establecidos. La determinación debe hacerse por medio de pruebas de campo ejecutadas de acuerdo con las especificaciones, entonces, a medida que el trabajo progresa debe inspeccionarse para asegurarse que continuamente se ajusta a lo establecido. Previamente, también pueden hacerse los llamados terraplenes de prueba mediante los cuales se determinan la forma en que deberá procederse para llevar la especificación correcta a la obra definitiva.

El grado de compactación G_c (en %), que ha de lograrse en lugar es la relación entre el peso volumétrico seco P_{Vc} campo, obtenido con el equipo in situ y el peso volumétrico seco máximo de laboratorio P_{Vd} laboratorio, y se expresa de la siguiente forma:

$$G_c = \frac{P_{Vc} \text{ campo}}{P_{Vd} \text{ laboratorio}} * 100$$

debiéndose indicar con respecto a que prueba de laboratorio se obtuvo el P_{Vd} laboratorio.

Para medir el peso volumétrico seco P_{Vc} campo, obtenido in situ, existen varios métodos; por lo cual explicaremos algunos de los más importantes:

- 1.5.a . - Medida física de peso y volumen
- 1.5.b . - Mediciones Nucleares
- 1.5.c . - Otros

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

Este método consiste en (véase figura 1. c) página 31:

- a). - Se realiza un sondeo de 10 a 15 cm. de diámetro, o un cuadrado de 15 cm. por lado, a la misma profundidad de la capa por probar.
- b). - El material extraído de este sondeo es cuidadosamente recogido y pesado ($P_h = 2.192 \text{ kg}$).
- c). - Se extrae una muestra verdaderamente representativa del material pesado en el anterior inciso ($P'_h = 105 \text{ gr}$).
- d). - Se realiza el secado de una muestra representativa y se pesa ($p'_s = 100 \text{ gr}$).
- e). - Se pesa arena de Ottawa de peso volumétrico conocido (ejem: $P_{Va} = 1.3 \text{ kg / lt}$.) y se rellena el sondeo ($P_a = 3.00 \text{ Kg}$).
- f). - Sé enrasa el sondeo y se pesa la arena sobrante ($P'_a = 1.44 \text{ Kg}$).

Cálculos

1. - Peso de la arena que entro en el sondeo:

$$P_{aes} = P_a - P'_a = 3.00 - 1.44 = 1.56 \text{ Kg}$$

2. - Volumen de la arena que entro en el sondeo, igual al volumen (V_c) del material compactado:

$$V_c = P_{aes} / P_{Va} = 1.56 / 1.3 = 1.2 \text{ lts.}$$

3. - Relación de humedad (r):

$$r = P'h / P_s = 105 / 100 = 1.05$$

4. - Peso seco del material (p_s):

$$P_s = P_h / r = 2.192 / 1.05 = 2.088 \text{ Kg}$$

5. - Peso volumétrico seco (PVS):

$$PVS = (P_s / V_c) * 1000 = (2.088 / 1.2) * 1000 = 1740 \text{ Kg/M}^3$$

1000 = Factor de unidades

1.5.b.- Prueba de medición Nuclear: Desde hace 40 años existe la posibilidad de medir la densidad húmeda gracias a métodos nucleares. Los primeros aparatos tenían múltiples defectos, de los que el menor no era la ausencia de reproductibilidad de la medida.

La determinación del peso volumétrico y contenido de agua por medio del uso de materiales radioactivos es sin duda, de los métodos más rápidos.

La teoría consiste fundamentalmente en la determinación del PV_m de un suelo por medio del efecto de Compton, este efecto puede enunciarse en la forma siguiente "el choque de los fotones (de que están constituidos los rayos gamma) con los electrones, antes y después se comportan elásticamente como cuerpos que tienen energía cinética y cantidad de movimiento, cuyas dos magnitudes se conservan después del choque".

Para evitar el tiempo y costo que significa la prueba de medida física de peso y volumen se ideó el método Nuclear, que consta de un bloque de plomo que contiene un isótopo un tubo Geiger (ver figura I. d) página 32.

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

El método Nuclear, también, se puede aplicar en terraplenes de prueba para determinar la forma en que se ejecutará la compactación; la compañía Clark Scheid diseño un equipo de prueba que consiste de una estructura de concreto (ver figura I. e.) página 33, de 4.0 m. De ancho, 1.50 m. De profundidad y 18.0 m. De largo; dentro de esta estructura y en el centro está un túnel que tiene en su techo 4 tubos metálicos, que actúan como receptáculos para instrumentos de medición. La zona directamente arriba de estos instrumentos es cuidadosamente llenada con el material que será compactado, el grado de compactación es verificado por la medida de la absorción de la radioactividad antes y después de la compactación; la ventaja de este método es que la compactación puede ser determinada después de cada paso de compactación y exactamente en la misma ubicación (horizontal y vertical), porque el material no

es alterado. Igualmente, puede verificarse en cualquier profundidad deseada, simplemente cambiando la elevación de los isótopos y del contador Geiger. Como la medida de la compactación es siempre en la misma ubicación y con el mismo arreglo y contenido de humedad, los resultados son extremadamente precisos y significativos.

Uno de los 4 tubos contiene un isótopo radioactivo (una preparación de 20 milicurie de Celsio), y está embutido en un forro especial de plomo y los rayos pueden ser emitidos únicamente en un plano horizontal; los otros 3 tubos contienen contadores Geiger y están colocados exactamente a 40 cm. del isótopo, cada contador Geiger mide la radiación que pasa a través de la zona y los resultados son entonces promediados para minimizar errores e inexactitudes. El número de pulsaciones o vibraciones para un período de 2 minutos representa un particular peso volumétrico húmedo, el real entonces puede leerse comparando el número de pulsaciones con los de una curva calibrada, de este modo puede determinarse el grado de compactación, (Ver Figura I. e.y gráfica I. c) página 33. Calibrar la lectura del aparato para las condiciones de la obra.

Ventajas de los métodos Nucleares:

1. - Rapidez en la ejecución de la prueba y obtención de los resultados.
2. - La prueba en sí no es destructiva, pues los agujeros que se hacen con el método estándar pueden originar posibles fallas al pavimento.
3. - No hay retardos en la construcción, puesto que los resultados se obtienen entre 25 y 35 minutos.
4. - Se obtiene un mejor control de un tramo, determinado, ya que pueden ejecutarse un número mayor de pruebas que con el método estándar.
5. - El trabajo físico en la ejecución de la prueba es menor que con el estándar.
6. - El método se puede usar ventajosamente en los suelos que presentan las siguientes características:
 - a). - Suelos suficientemente uniformes a tal grado, que una curva de calibración puede ser establecida y mantenida.
 - b). - En suelos cuyo peso volumétrico seco máximo permanezca constante.
 - c). - En lugares donde la prueba estándar sea muy tardada.

Desventajas de los métodos Nucleares

1. - No puede ser usado indistintamente en todos los suelos, sin antes comprobar la curva de calibración (P_{Vm}, w) de un suelo dado.
2. - El costo del aparato es relativamente alto.
3. - El equipo es afectado por las bajas temperaturas cuando estas son menores a 0°C . Los conteos son menores que los obtenidos a temperaturas normales.
4. - A muy bajas temperaturas los cables de los aparatos para medir P_{Vm} y w, se vuelven demasiado rígidos, volviéndose bastante quebradizos.
5. - Necesidad de preparar operadores con especial entrenamiento en su operación, funcionamiento y alcance de los aparatos, así como tener conocimientos sobre el fenómeno que se produce y sobre las precauciones a guardar contra la radiación.
6. - Inspección periódica que debe hacerse a los aparatos por la Comisión de Energía Nuclear.
7. - Peligro que entraña el uso de materiales radioactivos.
8. - Interpretación errónea de los resultados. (Influencia de zonas de las cuales en ocasiones no se desea conocer el grado de compactación). Ejemplo del terreno natural al estudiar la primera capa de terracerías construida.

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

I.5.c. - Otros: Como el problema principal es la determinación de la humedad se han desarrollado últimamente algunos métodos entre los que destaca principalmente el denominado "Speedy" (ver figura I. f) página 34, que consiste en colocar un peso conocido de suelo mezclado con carburo de calcio dentro de un recipiente hermético provisto de manómetro. El carburo reacciona con la humedad del suelo, produciendo gas acetileno y por lo tanto una presión que es registrada en el manómetro el que se puede inclusive graduar en gramos de agua, determinándose rápidamente de esta manera el porcentaje de humedad, y así poder calcular su peso volumétrico seco.

Penetrómetro de Proctor

Otro dispositivo empleado en el control de la compactación es el Penetrómetro de Proctor, que consiste en una aguja que se introduce en el material, tanto en el usado en el molde de prueba como en el campo; si la resistencia a la penetración es razonablemente cercana en ambos casos, entonces, se han alcanzado los resultados deseados (ya que la resistencia a la penetración está en función del grado de compactación y de la humedad), si no se habrán de alterarse el resultado de campo y los procedimientos de compactación.

Esta prueba puede emplearse para controlar la humedad y el peso volumétrico en el terraplén, siempre y cuando los materiales usados sean de granos finos, la humedad uniforme y, sobre todo, que el laboratorio de campo, al hacer el estudio de los préstamos haya hecho la prueba Proctor y determinado en cada uno de sus puntos la resistencia a la penetración, por medio de un dinamómetro y agujas, construyendo las correspondientes gráficas; de las agujas, hay 2 tipos, con graduación en Sistema Inglés y en Sistema Métrico Decimal (Ver tablas I. d).

Sistema Inglés

Aguja No.	0	1	2	3	4	5
Diámetro, cm.	0.453	0.631	0.909	1.435	2.039	2.87
Área, cm ²	0.161	0.322	0.645	1.613	3.26	6.452

Sistema Métrico Decimal

Aguja No.	10	5	2	1	0.5	0.2
Diámetro, cm.	0.357	0.506	0.799	1.13	1.597	2.531
Área, cm ³	0.1	0.2	0.5	1	2	5

Tablas I. d

La lectura del dinamómetro en Kg, se divide entre el área en cm². De la aguja usada, para obtener la resistencia a la penetración en Kg. / cm².

Procedimiento de ensaye:

- A. – Se efectúa una prueba de compactación Proctor, siendo el procedimiento el ya indicado; pero al tener en cada punto de la gráfica de compactación el cilindro con el material compactado y enrasado, se coloca el marcador del dinamómetro en el tope inferior de éste, que corresponde a la lectura de 0 Kg.
- B. – Se coloca la aguja adecuada en el dinamómetro, se toma éste por el barril y se introduce la aguja más o menos 1.33 cm. en el material del cilindro.
- C. – Tomando el dinamómetro por el material, se introduce la aguja dentro del espécimen 6.33 cm. adicionales, a una velocidad aproximada de 1.33 cm. /seg.
- D. – Con lápiz rojo se marcan las distancias antes dichas, de 1.33 cm. y 7.66 cm., a partir del origen de la aguja si es plana o a partir del diámetro mayor en las agujas de punta semielipsoidal.
- E. – Se hace la lectura del dinamómetro, las lecturas deben estar comprendidas entre 20 Kg. Y 40 Kg.; si la lectura es menor de 20 Kg. debe utilizarse una aguja de mayor área y si es mayor de 40 Kg. debe usarse una aguja de menor área.
- F. – Todos los valores obtenidos, tanto de compactación como de resistencia a la penetración y humedad, pueden anotarse en un registro como el siguiente y así poder establecer un gráfico como lo indicada en la gráfica l. d. página. 39

Peso Volumétrico Seco, Kg. /m3.	1641	1664	1747	1815	1770	1700
Contenido de humedad, %	8.5	10.1	12	14	16.4	18.3

Resistencia a la Penetración de 7.66 cm.

Aguja número	0	0	1	1	3	3
Area, cm2	0.1613	0.1613	0.3226	0.3226	1.613	1.613
1ª. Lectura, Kg.	31.64	32.66	43.094	24.237	26.101	22.79
2ª. Lectura, Kg.	31.864	32.658	43.09	24.045	26.519	22.57
Promedio, Kg.	31.752	32.659	43.092	24.141	26.31	22.68
Resistencia, Kg./cm2.	196.8	202.5	133.6	74.5	16.3	14.1

Tabla l. e

I.6.- Trabajo del Equipo de Compactación

Teoría de Boussinesq.

Para comprender mejor la transmisión de los esfuerzos de compresión en un suelo, consideremos una placa rígida, de área "A", colocada sobre un suelo, a la que se aplica una carga "L", dando una presión de contacto "P" (ver figura I. g) página 35.

En el suelo se desarrollan presiones, si unimos los puntos de igual presión, obtendremos suficientes curvas de presión.

Obsérvese lo siguiente:

a). - si aumenta el tamaño de la placa pero la presión permanece constante, incrementando la carga: la profundidad del bulbo de presión aumenta (ver figura I. h) página 35.

b). - Si aumenta la presión, y el área permanece constante (ver figura I. i) página 36 la profundidad del bulbo no aumenta significativamente, pero la presión, y por lo tanto la energía de compactación, si aumenta.

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 tener suficiente presión en el suelo para obtener la compactación deseada.

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

De (a) se deduce que 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 fue desarrollada por Boussinesq para un medio elástico. Para fines prácticos todos los suelos son elásticos y la teoría es razonablemente cierta aún para suelos granulares.

I.7.- Energías de compactación

La energía que se requiere para compactar los suelos en el campo se puede aplicar mediante cualquiera de las formas que adelante se enumeran, las cuales se diferencian por la naturaleza de los esfuerzos aplicados y por la duración de los mismos. Estas formas son:

- I.7.a. - Compactación por presión Estática: Es producto de una fuerza vertical aplicada por el compactador a una superficie de área.
- I.7.b. - Compactación por impacto: Golpeo con una carga de corta duración, alta amplitud y baja frecuencia.
- I.7.c. - Compactación por vibración: Golpeo con una carga de corta duración, alta frecuencia, baja amplitud.
- I.7.d. - Compactación por amasamiento: Acción de amasado, reorientación de partículas próximas, causando una reducción de vacíos.

Los esfuerzos mecánicos empleados en la compactación, son una combinación de uno o más de los efectos antes mencionados.

I.7.a.- Compactación por Presión Estática.

La energía que se requiere para compactar los suelos en el campo se pueden aplicar mediante cualquiera de las formas que adelante se enumeran, las cuales se diferencian por la naturaleza de los esfuerzos aplicados y por la duración de los mismos.

Este principio se basa en la aplicación de pesos más o menos grandes sobre la superficie del suelo.

La acción de este principio de compactación es de arriba hacia abajo, es decir, las capas superiores alcanzan primero mayores densidades que las de abajo.

La profundidad de acción puede calcularse por medio de la siguiente fórmula, basado en el criterio de bulbo de presión.

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

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

- a). - Su acción de arriba hacia abajo: El inconveniente de que la parte superior se compacte primero que la de abajo, es que el esfuerzo compactivo debe atravesar la parte ya compactada, para poder compactar la inferior. Se consume por lo tanto mayor energía de compactación.

También suele suceder que las características granulométricas del material varíen, debido a la sobrecompresión de la porción superior de la capa; dicha sobrecompactación o exceso de energía compactiva produce una fragmentación de partículas.

I.7.b.- Compactación por Impacto.

Cuando un cuerpo se levanta sobre una superficie y se deja caer, la presión que ejerce sobre ésta es mayor que la presión que ejerce el mismo cuerpo estando apoyado estáticamente sobre dicha superficie.

En esta característica se basa el principio de compactación por impacto.

La compactación por medio de impacto se logra aplicando rápidamente una fuerza sobre el suelo, con alta amplitud y baja frecuencia.

Cuando la unidad compactada tiene una frecuencia baja y una amplitud grande, la unidad cae dentro de este tipo de compactación.

Generalmente se estima que las fuerzas que se aplican por impacto, están en frecuencias de 50 a 600 golpes por minuto.

En Alemania se hace uso de este principio para compactar arenas. Se dejan caer pesos de una tonelada sobre capas gruesas de arena con ayuda de una grúa.

Deja un acabado muy malo por lo que se usa solo en el cuerpo del terraplén.

I.7.c.- Compactación por Vibración.

Los albores de la compactación de suelos mediante vibración aparecieron en 1930. El resultado de las primeras experiencias alentó el desarrollo de la compactación dinámica, al observarse que la vibración daba una rápida y efectiva compactación.

Al principio, los compactadores vibratorios estaban hechos de una placa inferior de vibración y tenían relativamente baja velocidad y baja capacidad de producción; por lo que su campo de acción se encontraba limitado a pequeñas cantidades de obra.

Hace más o menos 40 años, el desarrollo de los rodillos vibratorios comenzó a cobrar importancia; esto constituyó un gran progreso, ya que fue posible obtener un aumento en la capacidad de compactación en suelos friccionantes.

Este principio de compactación es el que últimamente ha tenido mayor desarrollo.

Como en la compactación por presión estática, en este tipo de compactación también se aplica una cierta presión, pero al mismo tiempo se somete el material a rápidas y fuertes vibraciones, entre 700 y 4000, dependiendo del compactador.

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

Esto se puede demostrar mediante el experimento de girar un papalote de alabes dentro de un recipiente que contenga arena o grava, primero en estado estático y luego colocando el recipiente sobre una placa vibratoria (ver figura I. j) página 36.

La experiencia sueca nos proporciona los siguientes resultados usando un papalote:

Material	Contenido de agua, en %	Momento de resistencia, en Kg. -- cm ² .		Ingremento de la movilidad, debido a la vibración M1/M2.
		Estático M1	con vibración M2	
Grava	0	1700	40	42
Arena	10	600	45	13
Limo	12	150	25	6

Tabla I. f

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

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

La densificación de un material por medio de compactadores vibratorios es de abajo hacia arriba.

Ventajas de la Compactación por Vibración.

- a). - Es posible compactar a más altas densidades; facilita la obtención de los últimos porcentos del grado de compactación que son tan difíciles, y a veces imposibles, de obtener con compactadores estáticos.
- b). - Permite el uso de compactadores más pequeños. La gran eficiencia de los compactadores dinámicos facilita el hacer el mismo o mejor trabajo con compactadores más pequeños y livianos; esto se traduce en ahorro en fletes y en disminución de la resistencia a la tracción.

- c). - Se puede trabajar sobre capas de mayor espesor. El efecto de penetración de la compactación dinámica permite el trabajo con capas de mayor espesor, lo que significa rapidez y ahorro en el tendido y en la compactación.
- d). - Se obtiene mayor rendimiento con el menor número de pasadas. La rapidez es característica del trabajo dinámico. Compactadores vibratorios auto propulsados alcanzan el grado de compactación deseado en 2 a 4 pasadas.
- e). - Por las razones anteriores los costos de compactación resultan menores.

Quando se usa Compactación Dinámica

Resultados excelentes se obtienen casi sin excepción, en materiales de granulometría gruesa como piedra triturada, grava, arena y suelos arenosos conteniendo hasta 10 a 20 % de los materiales finos (limos y arcillas).

En estos tipos de materiales, la vibración normalmente produce densidades mayores que cualquier otro método de compactación. Suelos arenosos de graduación pobre con contenido de humedad bajo, son difíciles de compactar a las altas densidades logradas en materiales de buena graduación. La ventaja principal de la vibración en este caso, es la rápida compactación y la mayor profundidad de las capas.

El muy común suelo tipo residual, que cubre grandes extensiones de Sudamérica, África y otras partes del mundo, usualmente contiene entre 30 - 50 % de arcilla o limo. Se ha comprobado que dicho tipo de suelo puede ser económicamente compactado con rodillos vibratorios.

Resultados satisfactorios pueden ser obtenidos en muchos casos con materiales que contengan un gran porcentaje de arcilla (30 - 40 %). Arcillas duras no pueden ser compactadas usualmente con rodillos vibratorios comunes.

Para ampliar el campo de los compactadores vibratorios, se ha diseñado un rodillo pata de cabra vibratorio para la compactación mayor. Se han obtenido muy buenos resultados con este tipo de máquina compactadora, aquí la vibración es de alta amplitud y baja frecuencia, cayendo en el campo de impacto.

I.7.d.- Compactación por Amasamiento

Amasar en este caso puede confundirse con exprimir, es decir el efecto de una pata de cabra al penetrar en un material ejerce presión hacia todos lados, obligando al agua y/o al aire a salir por la superficie.

La compactación por este principio se lleva a cabo de abajo hacia arriba; es decir, las capas inferiores se densifican primero y las superiores posteriormente. Por esto se dice que un rodillo pata de cabra emerge o sale cuando el material se encuentra compactado debidamente.

Los rodillos pata de cabra se emplean fundamentalmente en materiales cohesivos; en cambio su efectividad es casi nula en materiales granulares.

Estos rodillos reacomodan las partículas alargadas disminuyendo el espacio entre las partículas, aumentando así el Peso Volumétrico.

No hay que olvidar que también los compactadores de llantas neumáticas tienen efectos amasadores debido a la flexibilidad de las llantas.

Los materiales cohesivos son arcillas y limos arcillosos; cohesión podemos definirla como la atracción mutua de las partículas de un suelo debido a fuerzas moleculares y a la presencia de humedad.

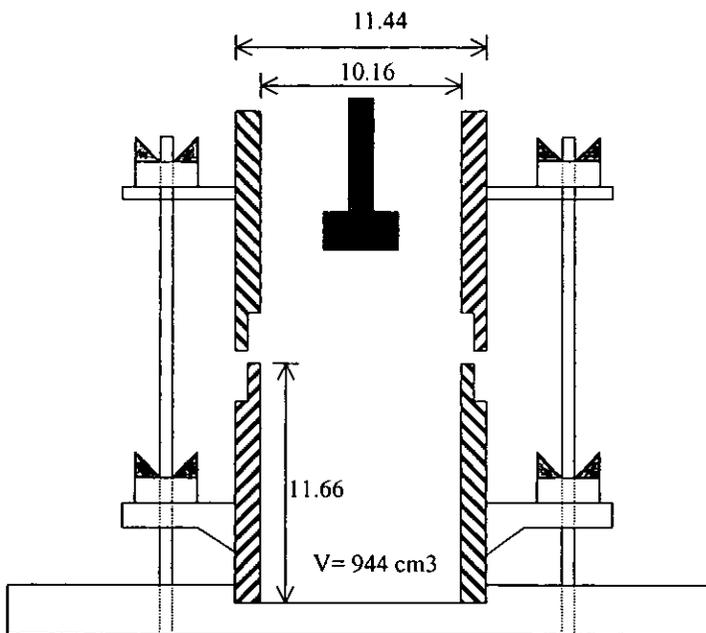


Figura I.a. Molde cilíndrico para prueba Proctor Estándar y Modificada (cotas en cm).

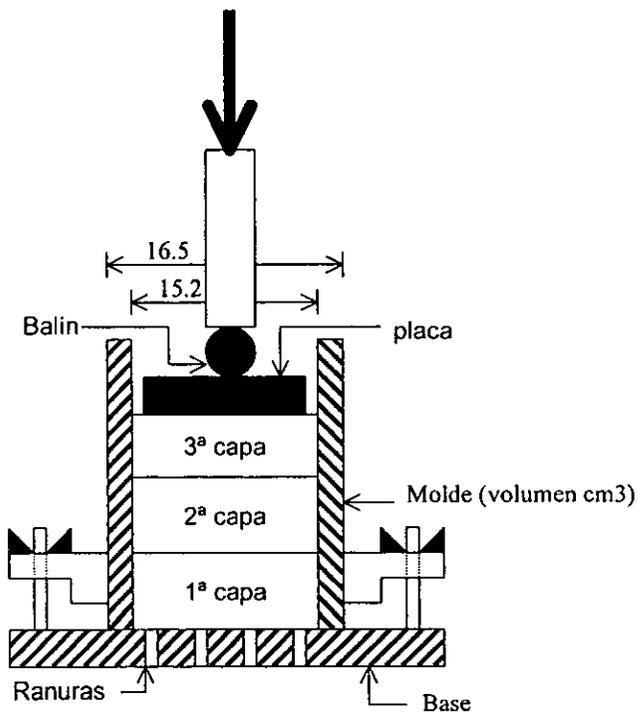
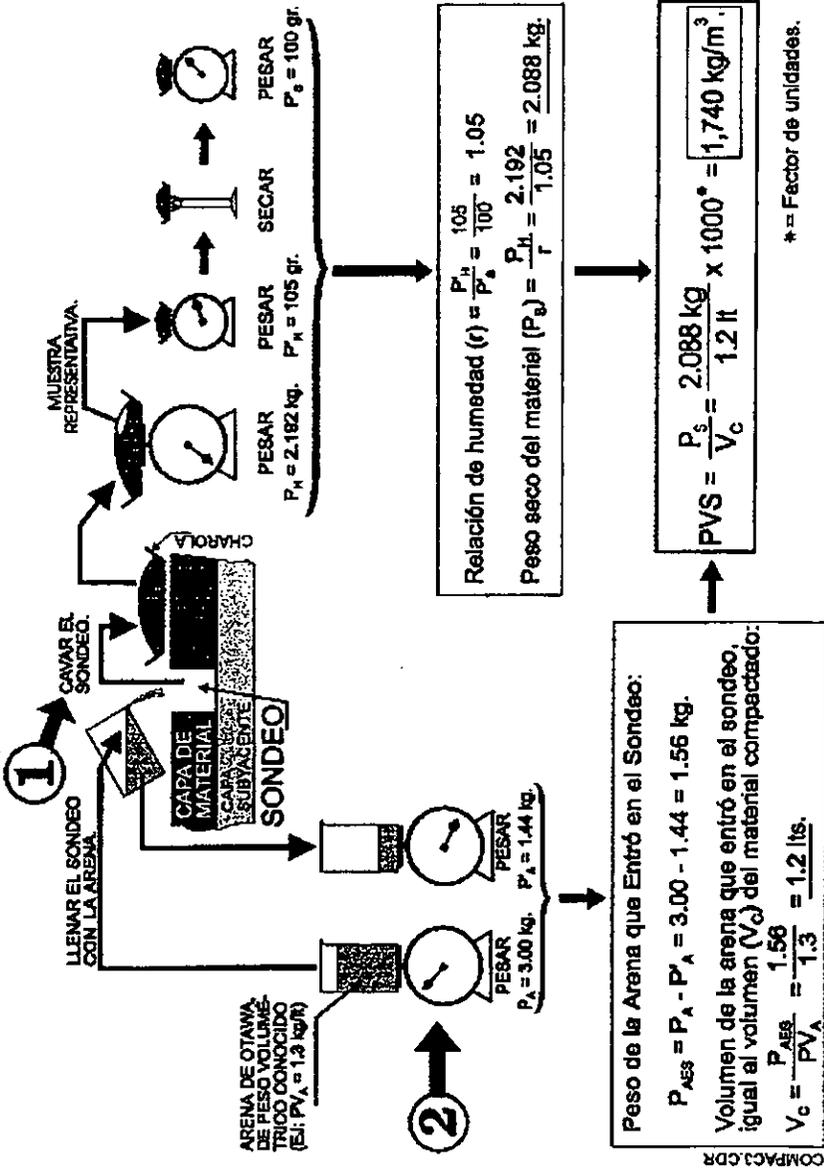


Figura 1.b.- Molde de Prueba Porter (dimensiones en mm.)

MEDICIÓN DEL PESO VOLUMÉTRICO EN UNA CAPA COMPACTADA.



igura 1. c.

COMPACT3.CDR

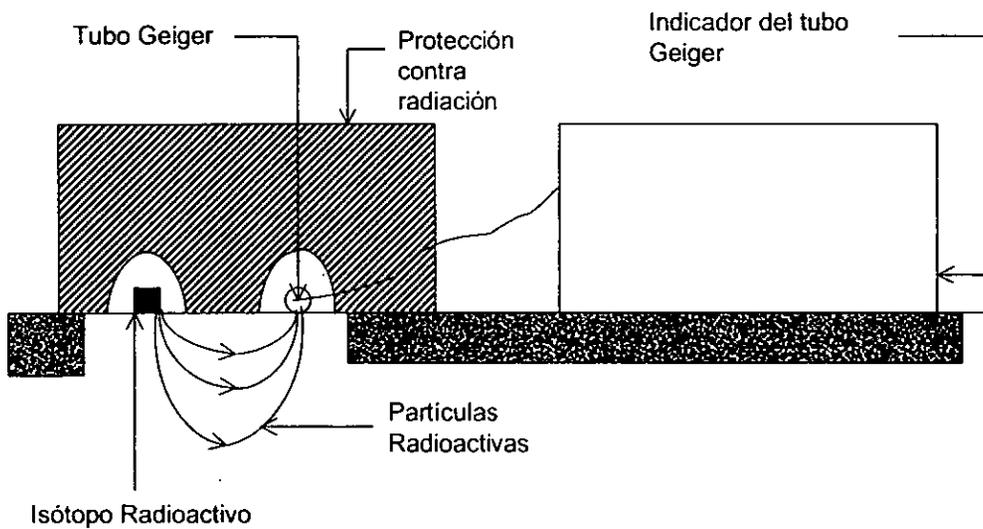


Figura I. d

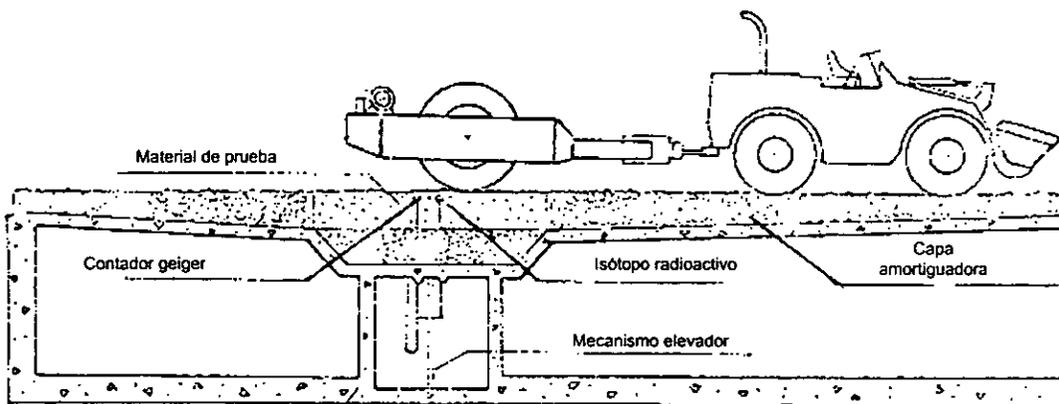
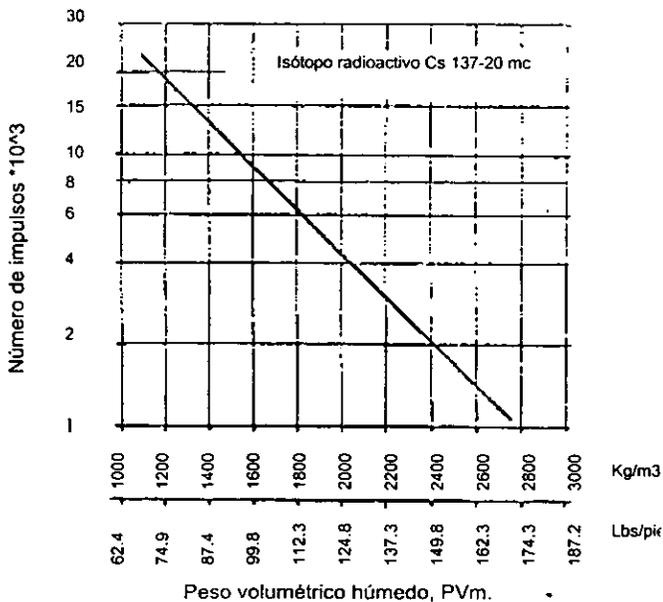


Figura I. e.- Método de prueba de Clark – Scheid.



Gráfica I. c.- Curva de calibración.

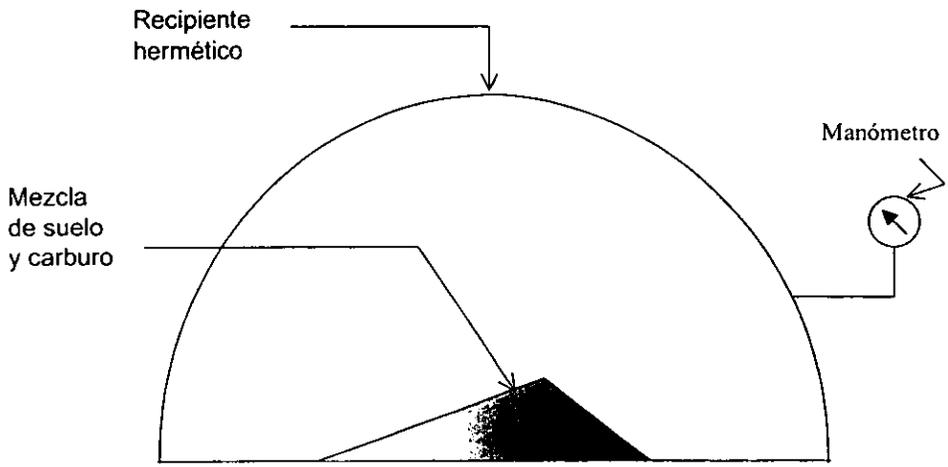


Figura I. f

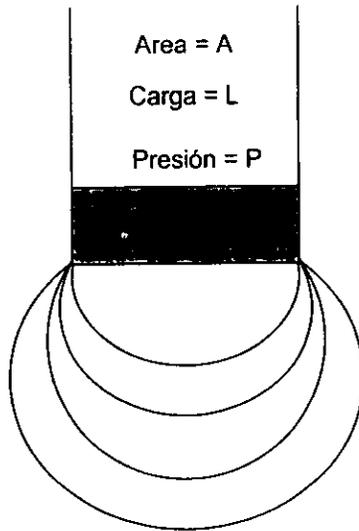


Figura I. g

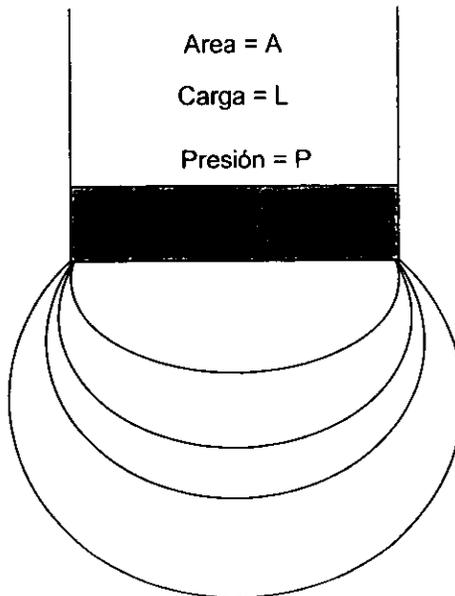


Figura I. h

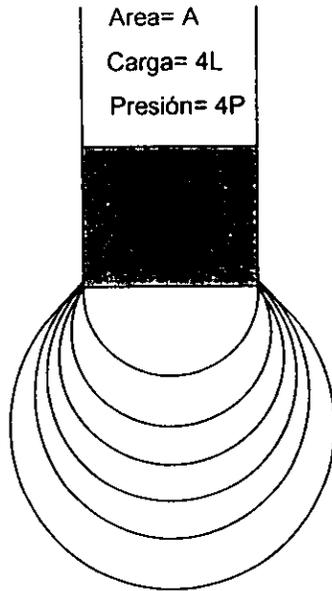


Figura I. i

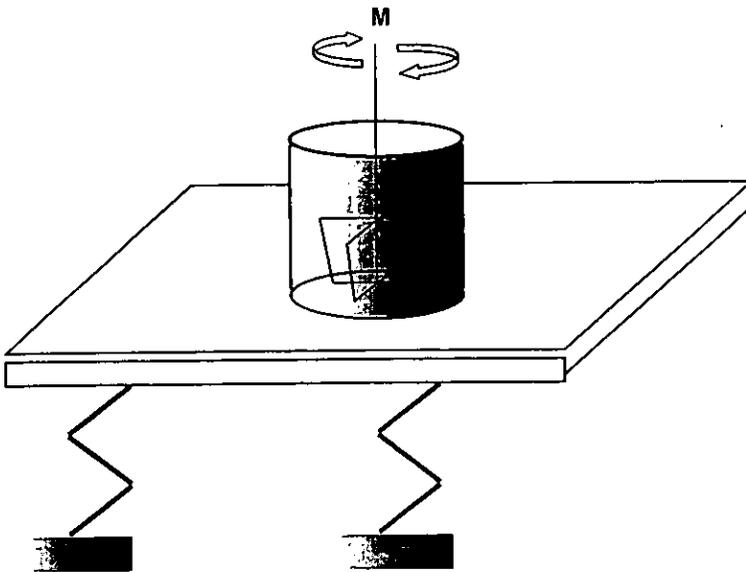
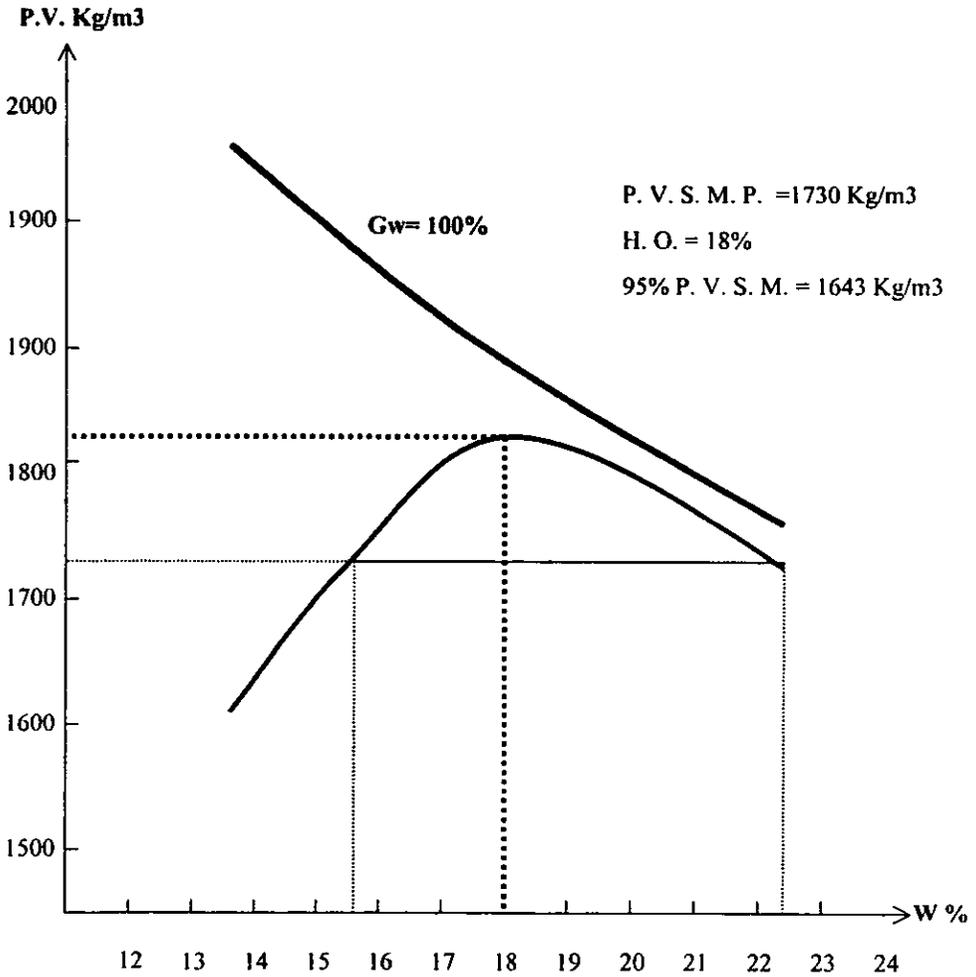
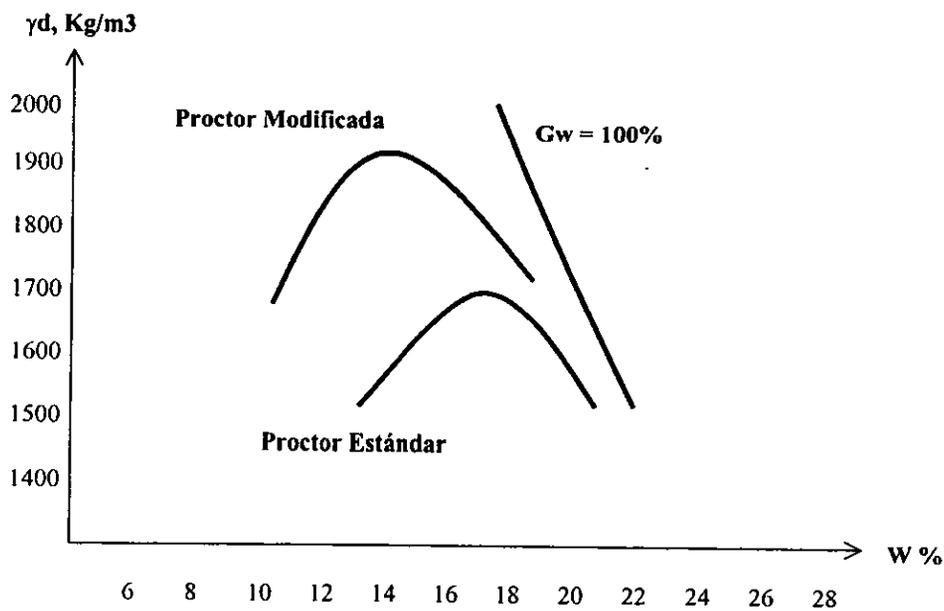


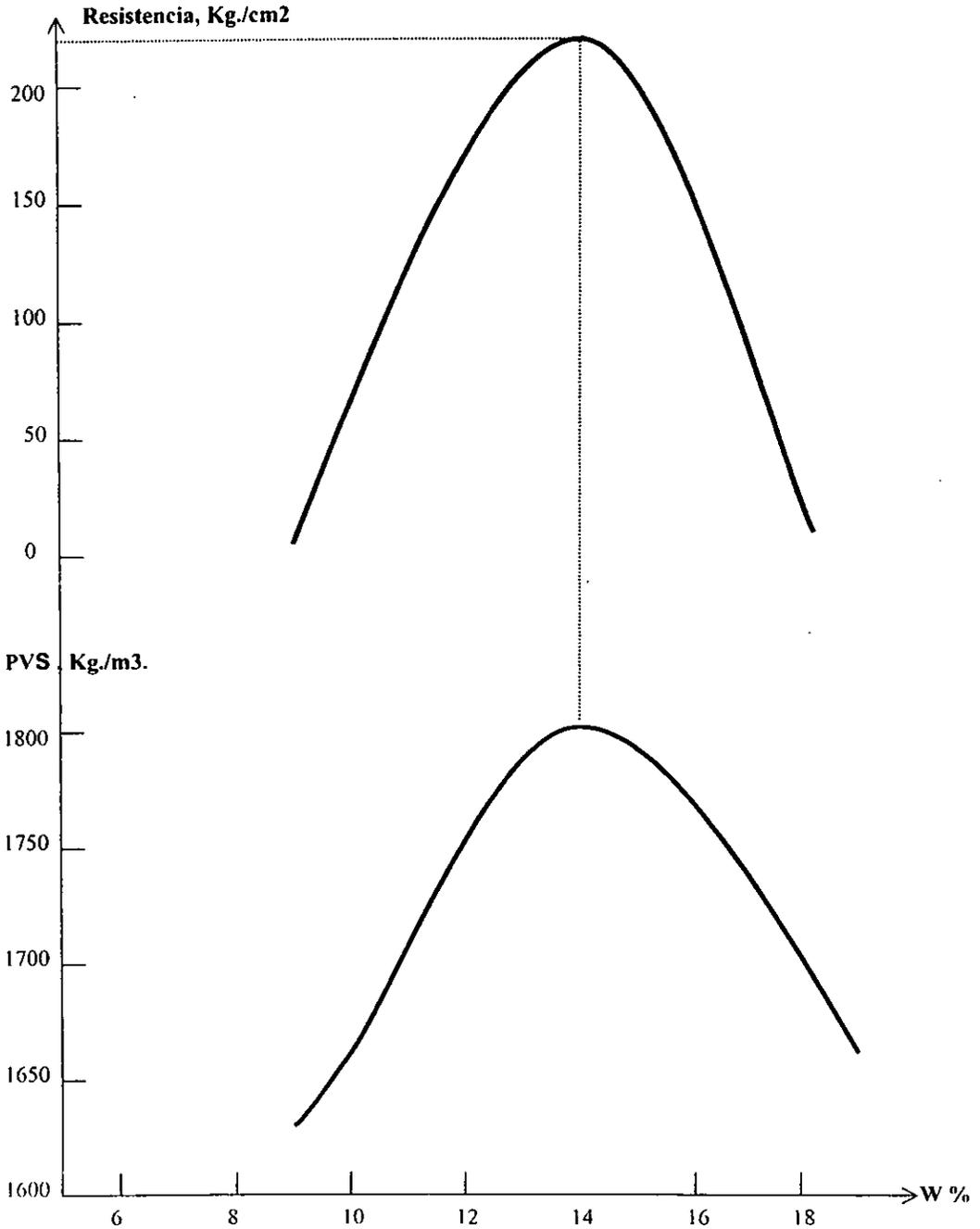
Figura I. J.- Dispositivo para medir el momento de resistencia



Gráfica I.a. Curva de compactación en Prueba Proctor Estándar y curva del 100% de Saturación



Gráfica I. b. Comparación entre pruebas Proctor Estándar y modificada.



Gráfica I. d.- Compactación - Resistencia a la penetración.

Capítulo II.- Equipos de compactación.

II.1.- Rodillos metálicos.

II.1.a.- Planchas Tandem.

II.1.b.- Planchas de tres Ruedas.

II.2.- Rodillos Neumáticos.

II.2.a.- De llantas Pequeñas.

II.2.b.- DE llantas Grandes.

II.3.- Rodillos Pata de Cabra.

II.4.- Rodillos de Reja.

II.5.- Rodillos de Impacto (Tamping Roller).

II.6.- Rodillos Vibratorios.

II.- Equipo de Compactación.

Definición

En la terminología de mecánica de suelos, la reducción de los vacíos de un suelo recibe varios nombres: Compactación, Densificación, etc., existen ligeras diferencias en el significado de los dos primeros.

Consolidación, se usa para la reducción de los vacíos, relativamente lenta, debida a la aplicación de una carga estática, usualmente acompañada de expulsión de agua del suelo, por ejemplo, la reducción de vacíos en el suelo bajo un edificio.

El término Compactación se usa para la reducción de vacíos, más o menos rápida, producida por medios mecánicos durante el proceso de construcción (ver figura. II. a) página 49.

Al reducirse los vacíos del suelo hay un incremento del peso volumétrico del material, de donde se puede dar la siguiente definición.

La palabra Compactación se emplea para designar el incremento artificial del peso volumétrico seco de un suelo por medios mecánicos, esto se logra mediante la acción natural de las sobrecargas impuestas que provocan la reducción de los vacíos del mismo al conseguir un mejor acomodo de las partículas que los forman mediante la expulsión de aire y/o agua del material.

Las bases y cimientos bien compactados, también poseen gran solidez y resistencia a la deformación.

Lo constituye el conjunto de máquinas que, en la construcción de terraplenes, Sub - bases y bases sirven para consolidar los suelos, de acuerdo al grado de compactación especificado.

Debemos tener en mente que, en la construcción pesada, la inversión en equipo es cuantiosa y que éste se adquiere usualmente fuera del país, por lo que es muy importante pensar cuidadosamente todas las posibilidades para poder escoger la máquina más eficiente; esto es, el menor número posible de unidades para un trabajo determinado.

Con frecuencia, para un conjunto dado de circunstancias, se puede utilizar con éxito más de un tipo de equipo y procedimientos de compactación; no obstante, es usual que se tenga una combinación que ofrezca el resultado más económico.

Cabe señalar que actualmente existen mejoras en los equipos de compactación, tales como: poderosos sistemas hidráulicos, sensores electrónicos confiables, diseños más funcionales, mayor versatilidad en su uso, transmisiones rápidas, potentes motores, etc., las cuales se han traducido en una mayor producción de los equipos.

Hay una gran variedad de equipos de compactación, se describirán sus características básicas.

II.1.- Rodillos Metálicos.

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

Cuando estos rodillos inician la compactación de una capa el área de contacto es más o menos ancha y se forma un bulbo de presión de una cierta profundidad. Conforme avanza la compactación el ancho del área de contacto se reduce, y por lo tanto también se reduce la profundidad del bulbo de presión y aumentan los esfuerzos de compresión en la cercanía de la superficie (ver figura II. b) página 49. Estos esfuerzos son con agregados en frecuencia suficientes para triturar los materiales granularse, e invariablemente causan la formación de una costra en la superficie de la capa (encarpamiento).

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

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

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

Generalmente, estas máquinas son autopropulsadas y de gran peso. Pueden venir equipadas con aditamentos tales como limpiadores para evitar que el material se pegue en los rodillos y sistemas de riego para humedecer los rodillos que para ciertas operaciones es necesario.

Dentro de este equipo, que son la evolución de los rodillos de piedra utilizados por los romanos y otros pueblos antiguos, se puede hacer la división siguiente:

II.1. a .- Planchas Tandem.- Son aquellas que tienen dos rodillos metálicos paralelos. Los rodillos son generalmente huecos para ser lastrados con agua y/o arena. Tienen generalmente dos números 6 - 8 Ton.; el primero significa el peso de la máquina sin lastre y el segundo es el peso de la máquina lastrada totalmente (figura II. c) página 50. No deben usarse lastrados porque sobre esfuerzan el material.

Este tipo de aplanadoras se adaptan particularmente a la compactación de pavimentos pero se les encuentra más a menudo sobre rellenos, particularmente de trabajo ligero.

Los motores son de montaje central, paralelo o en ángulo recto con la dirección del movimiento.

II.1. b.- Planchas de Tres Ruedas.- Son quizás de más antiguo diseño; estas planchas tienen dos ruedas traseras paralelas y una rueda delantera; las ruedas pueden ser huecas para ser lastradas o formadas por placas de acero roladas con atiesadores (figura II. d) página 51.

Los pesos usualmente son entre 10 - 12 toneladas.

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

Tanto las planchas Tandem como las de tres rodillos, tienen bajas velocidades de operación y poca seguridad al compactar las orillas de terraplenes altos.

Son efectivas en todos los suelos, pero, por los inconvenientes mencionados y su bajo rendimiento hacen que su uso se limite a trabajos pequeños o al armado de una capa al inicio de la compactación.

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

II.2.- Rodillos Neumáticos.

El compactador con llantas neumáticas cada día es más usado para compactar en el movimiento de tierras y en la construcción de Pavimentos bituminosos, el éxito de este compactador radica en que proporciona un efecto más uniforme de compactación que el producido por el compactador de rodillo de acero.

Están formados principalmente por un chasis que soporta una caja para lastre y dos ejes de ruedas. El número de neumáticos es variable y son neumáticos lisos. Se colocan de tal manera que las huellas de las ruedas delanteras no se crucen con las traseras y tienen un sistema de suspensión independiente para cada uno de ellos. Algunos de estos equipos tienen montadas sus ruedas con ejes excéntricos para hacer que oscilen al rodar y aumentar así su efecto de amasamiento.

Los rodillos neumáticos son muy eficientes y a menudo esenciales para la compactación de Sub - bases, bases y carpetas, sus bulbos de presión son semejantes a los de los rodillos metálicos, pero el área de contacto permanece constante por lo que no se produce el efecto de reducción del bulbo. Por otra parte, el efecto de puenteo del rodillo metálico, sobre zonas suaves, se elimina con llantas de suspensión independiente (ver figura II. e.) página 52.

Estos compactadores pueden ser jalados o autopropulsados y se dividen conforme el tamaño de sus llantas en:

II.2. a.- De llantas pequeñas.

II.2. b.- De llantas grandes.

II.2. a.- De llantas pequeñas.- Generalmente tienen dos ejes en tandem y el número de llantas pueden variar entre 7 y 13 .El arreglo de las llantas es tal que las traseras traslapan con las delanteras (ver figura II. f) página 53.

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

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

Estos equipos no deben sobrecargarse ya que como resultado se tendrá desgaste de rodamientos y llantas, aunque sí se tendrá mayor área compactada.

Los compactadores de llantas pequeñas proporcionan casi la misma presión superficial que los de llantas grandes, quiebran más grumos de material, y no empujan mucho material adelante de ellos. Tienen mayor maniobrabilidad que los grandes, con menor fuerza motriz.

II.2. b.- De llantas grandes.- Son generalmente arrastrados por tractor y pesan de 15 a 50 ton. Tienen 4 o 6 llantas en un mismo eje. Su costo por hora es generalmente caro por el tipo de tractor que debe usarse para jalarlos. Son difíciles de maniobrar y de transportar, por lo que están siendo desplazados por otros equipos más ligeros y versátiles.

Existen cuatro formas de expresar la habilidad compactadora de compactadores de llantas neumáticas:

- 1) Peso total
- 2) Peso por llanta
- 3) Peso por cm. Lineal de ancho de llanta
- 4) Presión de inflado.

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

a). - Peso total.- No debe sobre lastrarse, usar el lastre cuando es recomendado por el fabricante.

b). - La presión de inflado.- si "p" es la presión de contacto (ver figura II. g) página 54: podemos observar que si aumentamos el peso sin aumentar la presión (ver figura II. h) página 54, aumentamos la profundidad de las curvas de Presión, esto nos permitiría trabajar capas de mayor espesor, pero el aumento de eficiencia es casi nulo, y las llantas duraran, menos pues estamos aumentando el trabajo de deformación de las llantas.

Si aumentamos la presión sin aumentar la carga (ver figura II. i) página 54 disminuimos la profundidad del bulbo de presión, y podemos llegar a encarpetar la capa. Esto puede ser eficiente si la capa es delgada como suele serlo en base, sub- base y carpetas.

Si aumentamos el peso y la presión (ver figura II. j) página 54 estamos aumentando la presión efectiva sobre la capa y por lo tanto el trabajo de compactación sobre la capa, sin embargo esto nos puede disminuir la vida útil del equipo, y aumentará la tendencia al rebote.

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

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

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

La presión de contacto de las ruedas, se calcula según se indica a continuación:

Presión de contacto = carga sobrerueda / área de contacto

La presión de inflado no es igual a la de contacto ya que interviene (en mucho) la rigidez de la llanta inflada.

Tienen aplicaciones especializadas como la compactación del terreno natural en aeropuertos (grandes extensiones, terreno plano, alto grado de compactación, fácil acceso, etc.), tienen gran utilidad para sellar las capas superiores, con lo que se logra una buena impermeabilidad.

II.3.- Rodillos Pata de Cabra.

Este equipo de compactación consiste de un cilindro en el cual hay unas piezas soldadas que sobresalen, conocidas con el nombre de patas de cabra que tienen forma variada.

El cilindro de la pata de cabra está hueco y puede llenarse con agua, arena o ambas para aumentar su peso.

Los rodillos patas de cabra normalmente se fabrican de dos tipos: ligeros y pasados

El rodillo es remolcado por un tractor por intermedio de una lanza.

En muy pocos trabajos se usa un rodillo solo sino que se agrupan, en dos, tres, cuatro y cinco tambores.

Estos compactadores concentran su peso sobre la relativamente pequeña superficie de todo un conjunto de puntas de forma variada (ver figura II. k) página 55 ejerciendo presiones estáticas muy grandes en los puntos en que las mencionadas protuberancias penetran en el suelo. Conforme se van dando pasadas y el material se va compactando, las patas profundizan cada vez menos en el suelo, y llega un momento en que ya no se produce ninguna compactación adicional; en una profundidad del orden de 6 cm, la superficie queda siempre distorsionada, pero se compacta bajo la siguiente capa que se tiende, por lo que los terraplenes no resultan estratificados.

Son ahora raramente usados, porque su resistencia a la tracción es muy grande, entonces se requieren equipos de tracción grandes y costosos, excepto para amasamiento y compactación de arcillas donde la estratificación debe ser eliminada, como en el corazón impermeable de una presa. Debido a la pequeña área de contacto de una pata y al alto peso de estos equipos el bulbo de presión es intenso y poco profundo. La compactación se consigue por penetración y amasamiento más que por efecto del bulbo de presión (ver figura II. l) página 55.

Los rodillos pata de cabra son lentos, tienen una gran resistencia al rodamiento, por lo que consumen mucha potencia. Este equipo es todavía pedido en especificaciones algunas veces, pero su uso está declinando debido a los altos costos que tienen, usualmente, por unidad de

volumen compactado (ver figura II. m) página 56 y han sido desplazadas por los compactadores de impacto que con rendimiento mayor y un menor esfuerzo de tracción tampoco estratifican los terraplenes.

Se considera que el vástago debe penetrar en el terreno, no menos de la cuarta o quinta parte de su longitud para poder considerar que todavía ejerce un efecto notable.

La tabla II. a presenta un resumen procedente de distintas fuentes en relación con el efecto de la presión de contacto bajo los vástagos en los grados de compactación obtenidos para varios suelos, considerando también variaciones en el área de contacto de los vástagos y en el número de pasadas.

Rodillos pata de cabra. Efecto de la presión de contacto en el peso volumétrico seco máximo.

Tipo de suelo	Presión de contacto	Área de contacto	No. de pasadas	Grado de compactación obtenido, respecto a la prueba Proctor Estándar.
Arena arcillosa	17.5	43.75	9	99
	31.5	43.75	9	99
Arena limosa I	17.5	43.75	8	102
	35	43.75	8	101
	52.5	43.75	8	101
Arcilla poco plástica	8.7	87.5	12	101
	26.2	87.5	12	101
Arcilla plástica	8	75.25	64	108
	17.5	31.5	64	108
Arcilla limosa II	8	75.25	64	112
	17.5	31.5	64	111
Arcilla arenosa	8	75.25	64	104
	17.5	31.5	64	104
Mezcla de grava, arena y arcilla	8	75.25	64	100
	17.5	31.5	64	99

Tabla II. a

En todos los casos el espesor de la capa compactada fue de 15 cm aproximadamente.

El rendimiento de los rodillos pata de cabra en el campo se ve influido por el manejo que se da a los equipos.

II.4.- Rodillo de Reja

Estos rodillos se componen de una a dos ruedas de rejilla de acero en un marco o bastidor que se emplea para el lastrado de la unidad mediante bloques de concreto o de acero. Su peso promedio es de 10 toneladas métricas pero puede alcanzar pesos mayores por medio del lastrado.

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

Al ser usado este equipo se encontró que era capaz de compactar a alta velocidad una gran variedad de suelos. Los puntos altos y bajos de la reja producen efecto de impacto, y cuando es remolcado a alta velocidad, produce efecto de vibración, efectivo en materiales granulares. El perfil alternado alto y bajo de la rejilla produce efecto de amasamiento por lo que este rodillo también es eficiente en materiales plásticos.

Desafortunadamente, como los materiales plásticos suelen ser pegajosos, se atascan de material los huecos de la reja y se reduce la eficiencia (ver figura II. n) página 57.

Estos rodillos, debido a su misma configuración no pueden dejar una superficie tersa como puede ser la base de una carretera.

II.5.- Rodillos de Impacto (Tamping Roller).

A causa de los problemas de limpieza del rodillo de reja, se diseñó un nuevo rodillo usando los mismos principios: el rodillo de impacto: Este es un rodillo metálico, en el que se han fijado unas salientes en forma aproximada de una pirámide rectangular truncada (ver figura II. o) página 58.

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

Estas salientes han sido diseñadas de tal manera que el área de contacto se incrementa con la penetración, ajustándose automáticamente la presión a la resistencia del suelo compactado (ver figura II. p) página 58.

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

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

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

El rodillo de impacto ha probado ser uno de los más versátiles y económicos compactadores en terracerías, capaz de compactar eficientemente la mayor parte de los suelos (ver figura II. q) página 59. Por otro lado estos rodillos han desplazado a los rodillos pata de cabra.

II.6.- Rodillos Vibratorios

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

La vibración provoca un reacomodo de las partículas del suelo que resulta en un incremento del peso volumétrico, pudiendo alcanzar espesores grandes de la capa (0.40 m.). Estos rodillos pueden producir un gran trabajo de compactación con relación a su peso estático ya que la principal fuente de trabajo es la fuerza dinámica de compactación (ver figura II. r) página 60.

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

Estos rodillos se clasifican por su tamaño, pequeños hasta 9000 kg de fuerza dinámica y grandes de más de 9000, pudiendo llegar hasta 20000 kg o más. Los grandes pueden llegar a sobreesforzar suelos débiles por lo que hay que manejarlos con cuidado.

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

En estos equipos el bastidor tiene un diseño especial que impide que las vibraciones de los rodillos se transmitan al mismo y al motor, dañándolos.

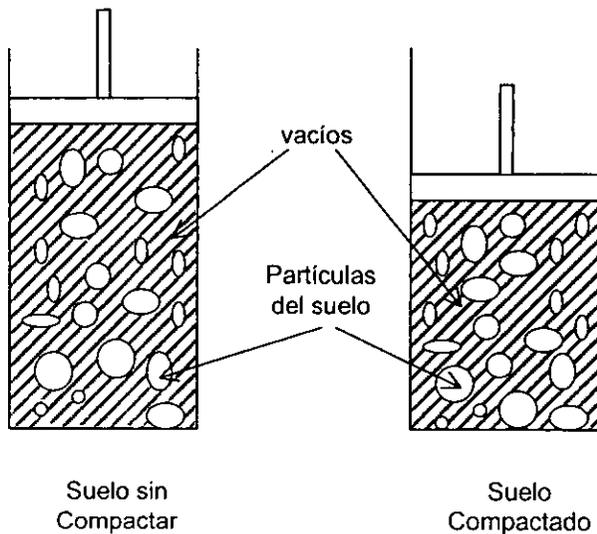


Figura II.a

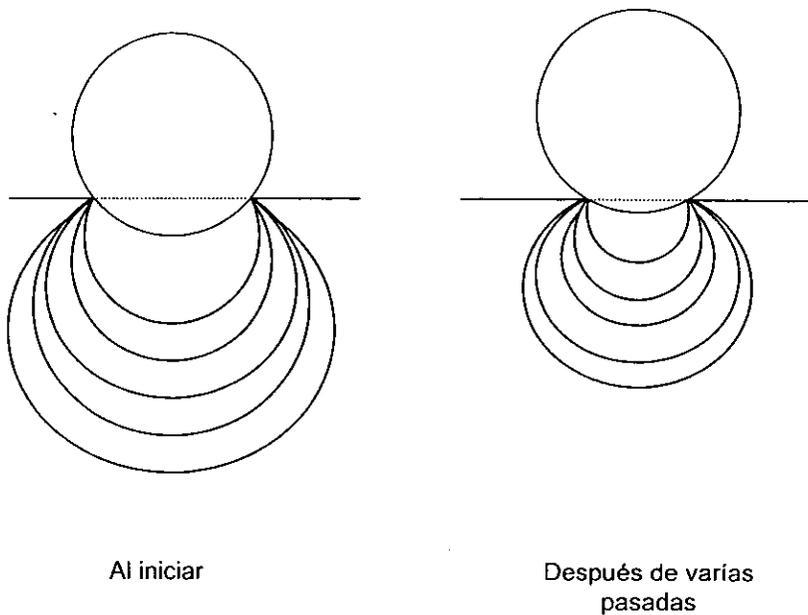


Figura II. b. Bulbos de presión bajo un rodillo metálico.

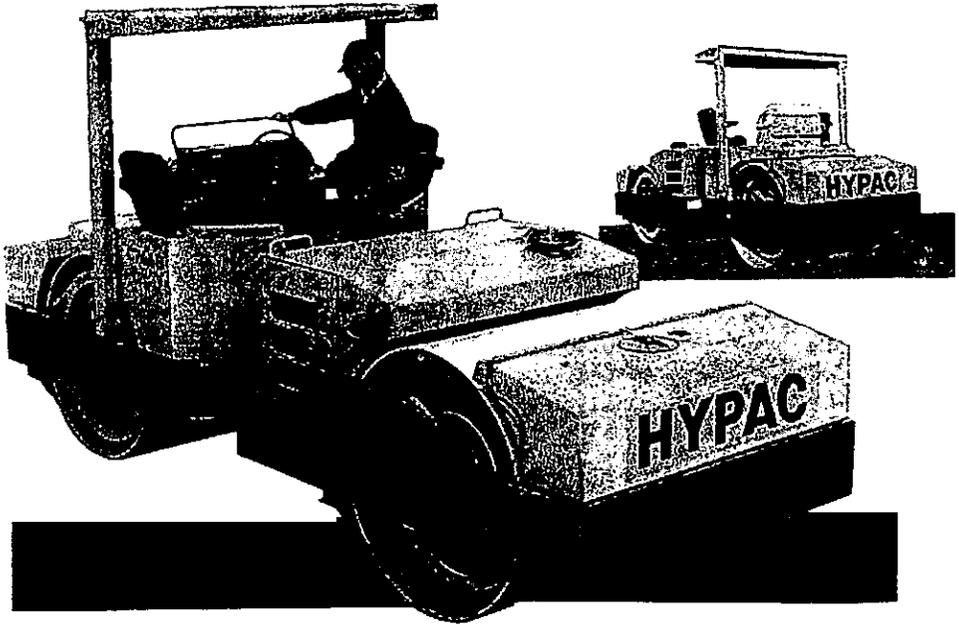


Figura II. c.- Rodillo metálico en tandem.

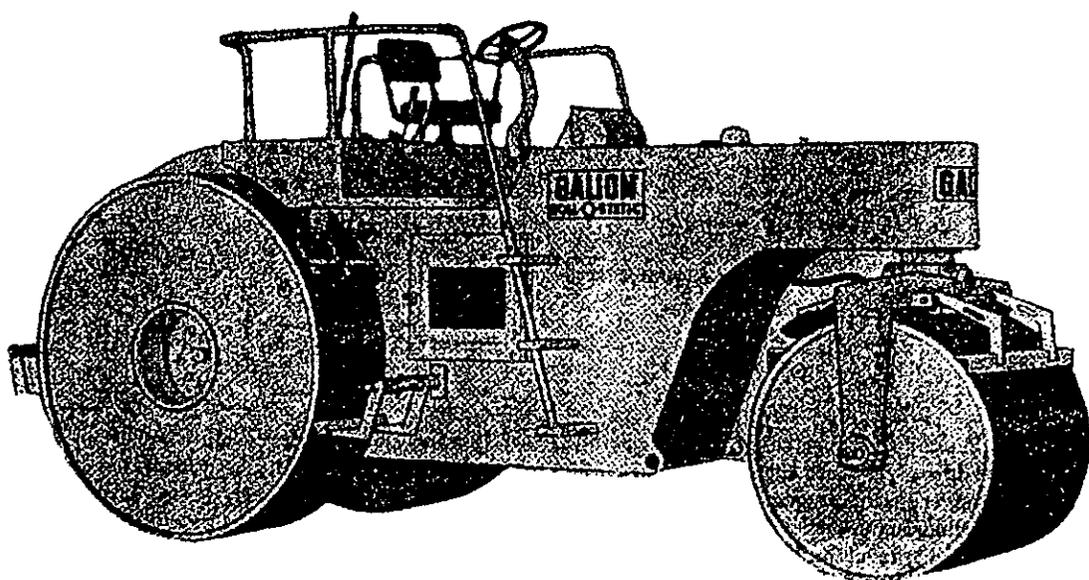
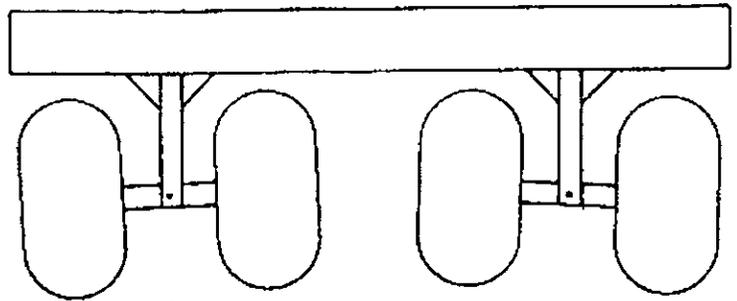
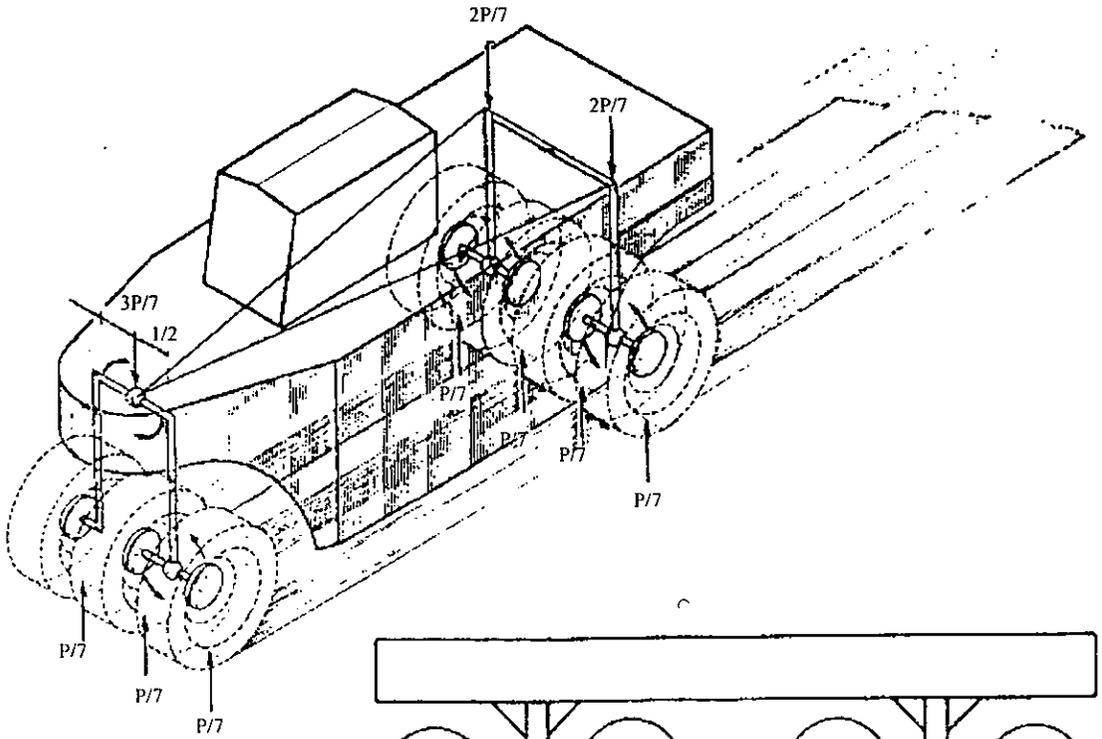


Figura II. d.- Planchas de tres rodillos



Figura II. e.- Compactador neumático



El eje trasero equivale a dos puntos de apoyo.

El eje delantero equivale a un punto de apoyo.

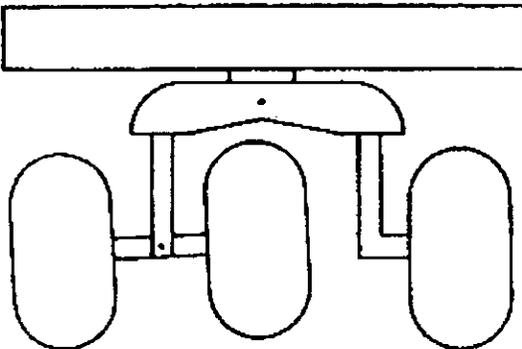


Figura II. F.- Compactador de 7 llantas neumáticas, con suspensión isostática oscilante e igual carga sobre las ruedas.

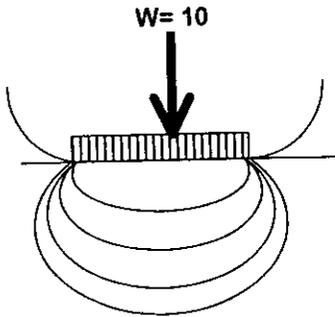


Figura II. g

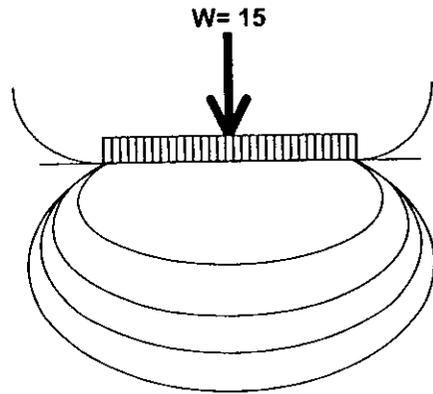


Figura II. h

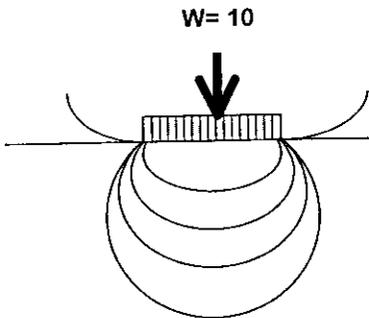


Figura II.i

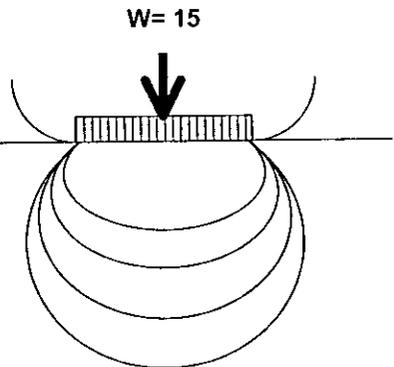


Figura II.j

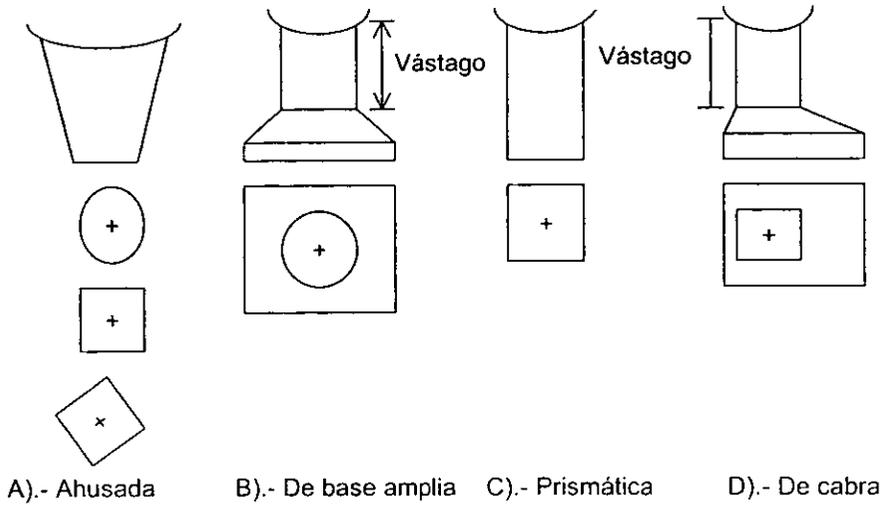


Figura II. k.- Formas variadas de puntas pata de cabra

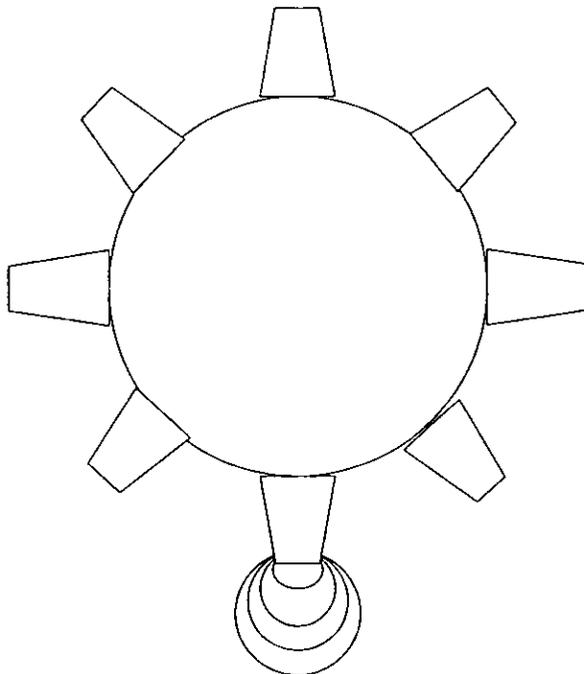


Figura II. I. Bulbo de presión bajo una pata de cabra.

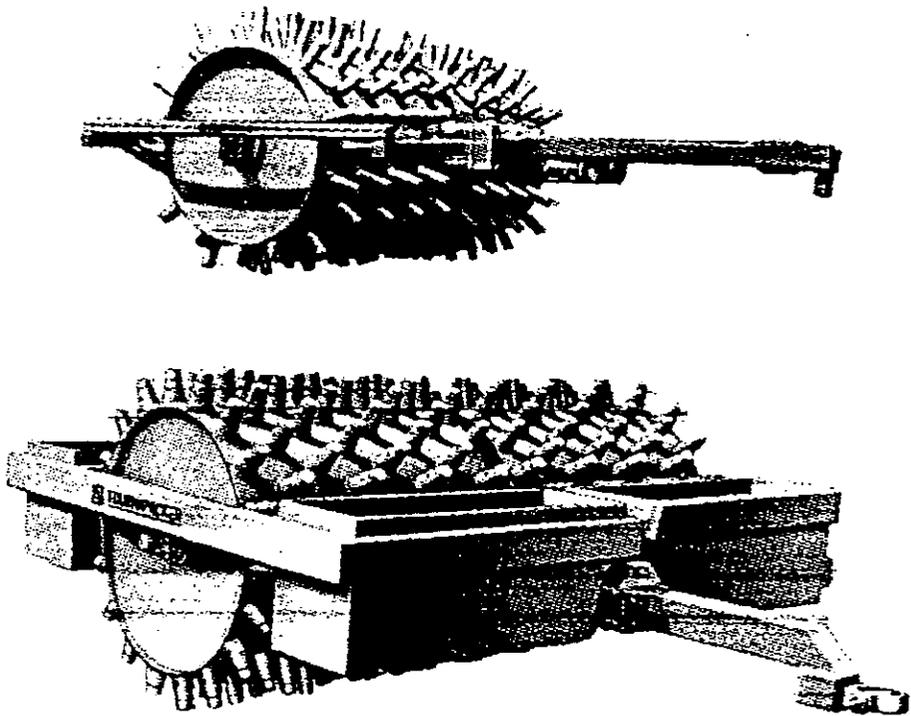
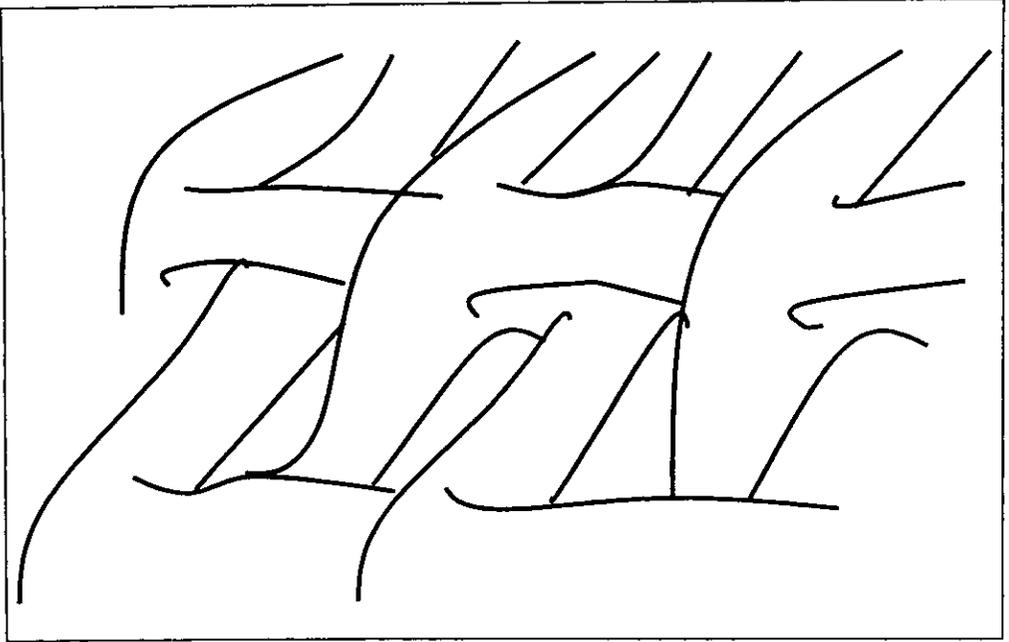


Figura II. m.- Rodillo pata de cabra



Configuración de reja

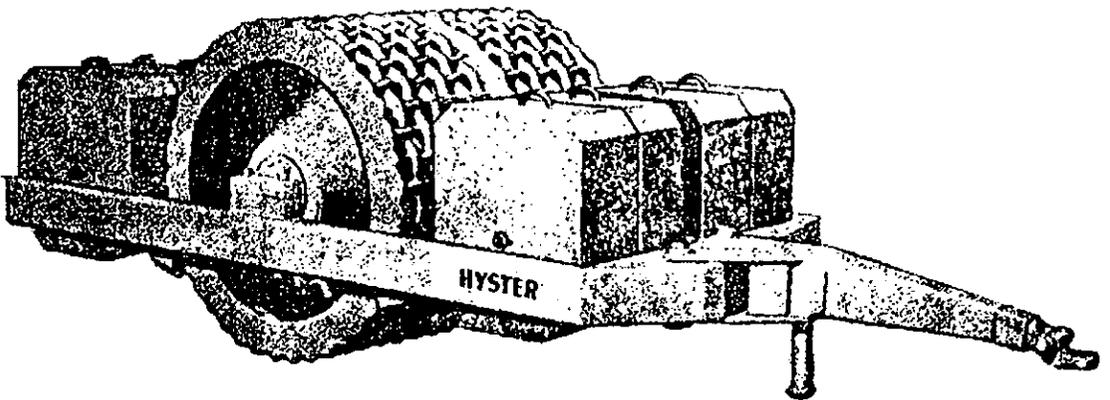


Figura II. n.- Rodillo de reja

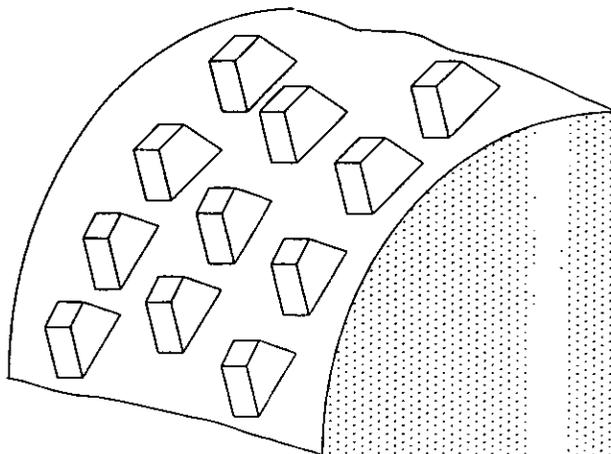


Figura II.o.- Sección de un rodillo de impacto, mostrando la distribución y forma de las pirámides.

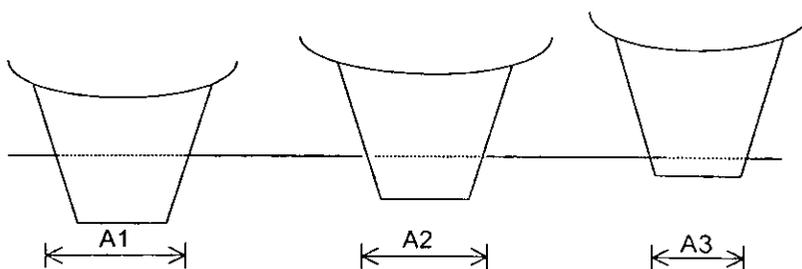


Figura II. p. Ajuste del área de apoyo.

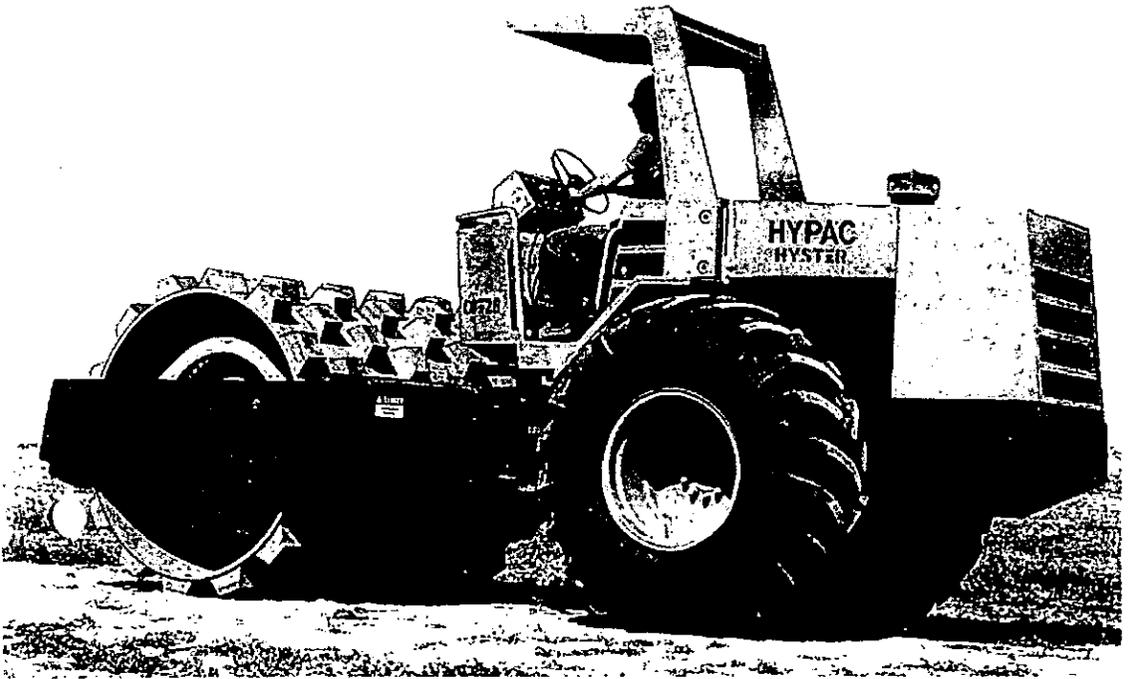


Figura II. q.- Rodillo de impacto.



Figura II. r.- Compactador vibratorio.

Capítulo III.- Factores que influyen en la compactación.

III.1.- Contenido de humedad.

III.2.- Granulometría del material.

III.3.- Número de pasadas necesarias.

III.4.- Peso del compactador.

III.5.- Presión de contacto.

III.6.- Velocidad del equipo compactador.

III.7.- Espesor de capa.

III.- Factores que influyen en la Compactación

Como es natural, un suelo puede compactarse de varias maneras, y en cada caso se obtendrá un resultado diferente; por otra parte, una misma forma de compactación dará resultados distintos si se aplica a diversos suelos; por último, si una misma forma de compactación se aplica a un suelo determinado, podrán lograrse resultados muy diferentes si de un caso a otro se varían ciertas condiciones de las prevalecientes en dicho suelo.

Los resultados de un proceso de compactación dependen de varios factores, unos que atañen al tipo de suelo, otros relativos al método de compactación que se emplee y, por último, varios más que se refieren a determinadas circunstancias que en ese momento pudieran prevalecer en el suelo con que se trabaja.

Los factores que primordialmente influyen en la obtención de una compactación económica son:

III.1. - Contenido de humedad del material.

III.2. - Granulometría del material.

III.3. - Número de pasadas del equipo.

III.4. - Peso del compactador.

III.5. - Presión de contacto.

III.6. - Velocidades del equipo compactador.

III.7. - Espesor de capa.

III.1. - Contenido de humedad.- El agua tiene en el proceso de compactación, el papel de lubricantes entre las partículas del material. Una falta de humedad exigirá mayor esfuerzo compactivo, así como también lo exigiría un exceso de la misma.

Debe recordarse que todo material tiene un contenido óptimo de humedad, para el cual se obtiene, bajo una cierta energía de compactación, una densidad máxima.

El agua, entonces, facilita el trabajo de compactación.

III.2. - Granulometría del material.- Para la obtención de una eficiente compactación es necesario, que haya partículas de varios tamaños en el material por compactar, ya que las partículas de menor tamaño ocuparán los espacios formados entre partículas de mayor tamaño.

Un suelo que contiene un tamaño muy uniforme de partículas (mal graduado), será difícilmente compactado. En cambio un suelo con amplia gama de tamaños (bien graduado). Se compacta mejor ya que las partículas de menor tamaño ocuparán los espacios formados entre las partículas de mayor tamaño.

Por lo que es muy importante considerar el Coeficiente de Uniformidad de Lars Forssblad, que es la relación entre el D60 y el D10.

El D60: Es el tamaño de la malla por el que pasa el 60 % del material.

El D10: Es el tamaño de la malla por el que pasa el 10% del material.

Si el $C_u > 7$, se tiene un excelente suelo (bien graduado) para compactar. Con amplio margen de tamaños de partículas y cantidades apreciables de cada tamaño intermedio.

Si el $7 > C_u > 3$, se tiene suelos, que presentan ciertos problemas para la compactación, las que podemos eliminar mejorando la granulometría y así obtener buenos resultados.

Si el $C_u < 3$, se tiene un pésimo suelo (mal graduado) para compactar.

Por ejemplo, en la gráfica de composición granulométrica (ver gráfica III.a) página 65, podemos observar de la curva (D), el D60 corresponde al material que pasa la malla de 11/2", tamaño igual a 19.05 mm y el D10 corresponde al material que pasa por la malla 80, tamaño igual a 0.250 mm. Si calculamos el coeficiente de Uniformidad tenemos que:

$$C_u = D60/D10 = 19.05 \text{ mm}/0.250 \text{ mm} = 76.2$$

lo que nos indica que es un excelente suelo para compactar, por que tiene una amplia gama de tamaños.

Es oportuno hacer notar aquí, que las formas de las partículas también tienen importancia en la compactación. Materiales con partículas de forma angulosa son generalmente más difícilmente compactados por sus acunamientos, que materiales con partículas redondeadas.

III.3. - Número de pasadas necesarias.- El número de pasadas que un equipo deba dar sobre un material dependerá de (ver gráfica III. b) página 66:

- A). - Tipo de compactación.
- B). - Tipo de material.
- C). - Contenido de humedad.
- D). - Forma en que aplique la presión al material.
- E). - Maniobrabilidad del equipo.

III.4. - Peso del compactador.- La presión ejercida sobre el material dependerá, en parte, del peso del equipo de compactación.

III.5. - Presión de contacto.- Más que el peso del compactador importa la presión de contacto; esta depende de:

- A). - Tipo del material.
- B). - Estado del material (Suelto o Semisuelto).
- C). - Área expuesta por el compactador
- D). - Presión de inflado en el caso de un equipo sobre neumáticos.
- E). - Peso del compactador
- F). - Temperatura del material tratándose de mezclas asfálticas

Los fabricantes de equipo de compactación se han preocupado por que sus maquinas ejerzan presiones de contacto uniformes, lo cual han logrado mediante suspensiones isostáticas.

Es necesario hacer hincapié, que resulta de mayor importancia la presión de contacto de un compactador, que el peso mismo.

Por ejemplo un compactador muy pesado necesita de un mayor número de llantas o de llantas más grandes, con lo cual, el área de contacto entre el compactador y el material se incrementa, resultando la presión de contacto, similar a la de un compactador normal con menos llantas o llantas menores

III.6.- Velocidades del equipo compactador.- La habilidad de producción de un equipo depende fundamentalmente de la velocidad que puede desarrollar sobre el material por compactar. Este es un aspecto muy interesante, en vista de que para el movimiento de tierras se ha estado mejorando continuamente el equipo, por lo que es necesario tener equipos de compactación eficientes y de capacidad a la altura del equipo que deposita el material.

De la velocidad de traslación del compactador y del número de pasadas dependerá, principalmente la producción. La velocidad estará entre los siguientes valores:

III.6.1.- Rodillos Metálicos y patas de Cabra.

Son lentos por naturaleza, entre más rápido, mejor, limitados sólo por la seguridad. 5 km por hora es un buen máximo.

III.6.2.- Rodillos de Reja o de Impacto.

Entre más rápido mejor, limitado sólo por la seguridad, normalmente de 10 a 20 km. por hora.

III.6.3.- Rodillos neumáticos.

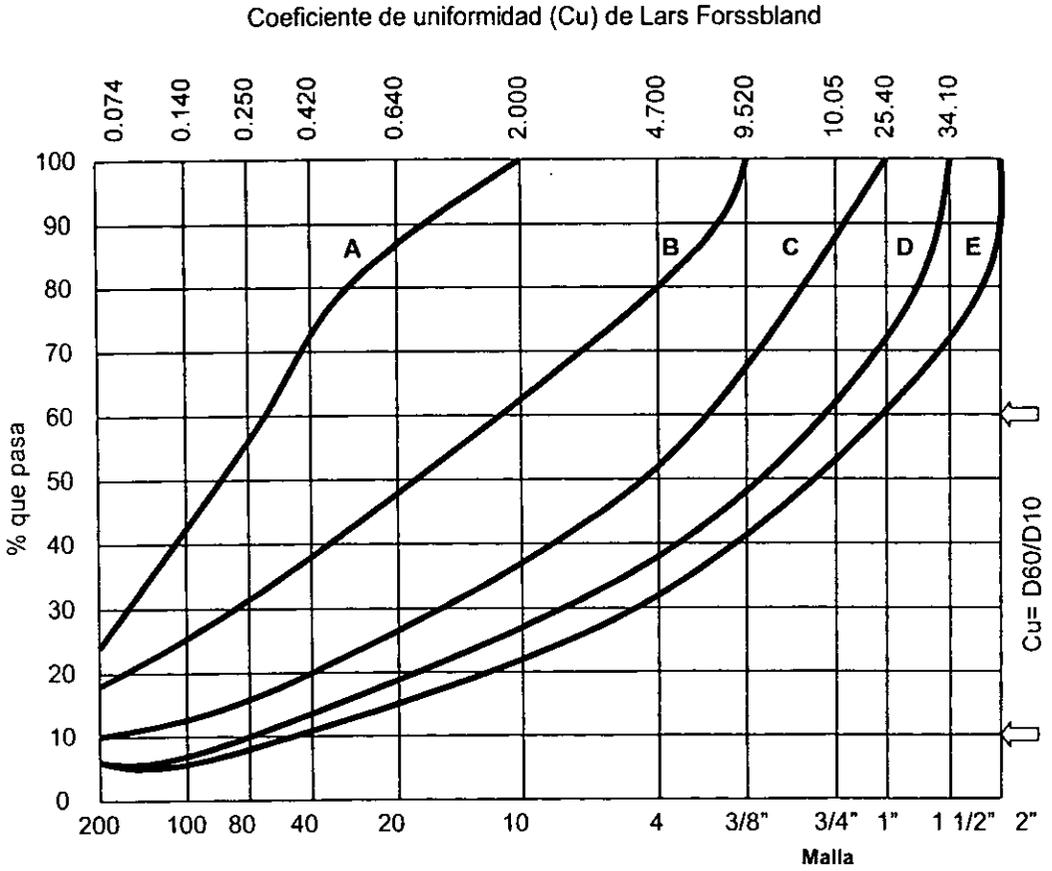
Entre más rápido mejor, excepto que haya rebotes, lo que puede causar ondulación de la capa, compactación dispareja y desgaste acelerado del Equipo. Normal de 4 a 8 Km por hora.

III.6.4. - Rodillos Vibratorios.

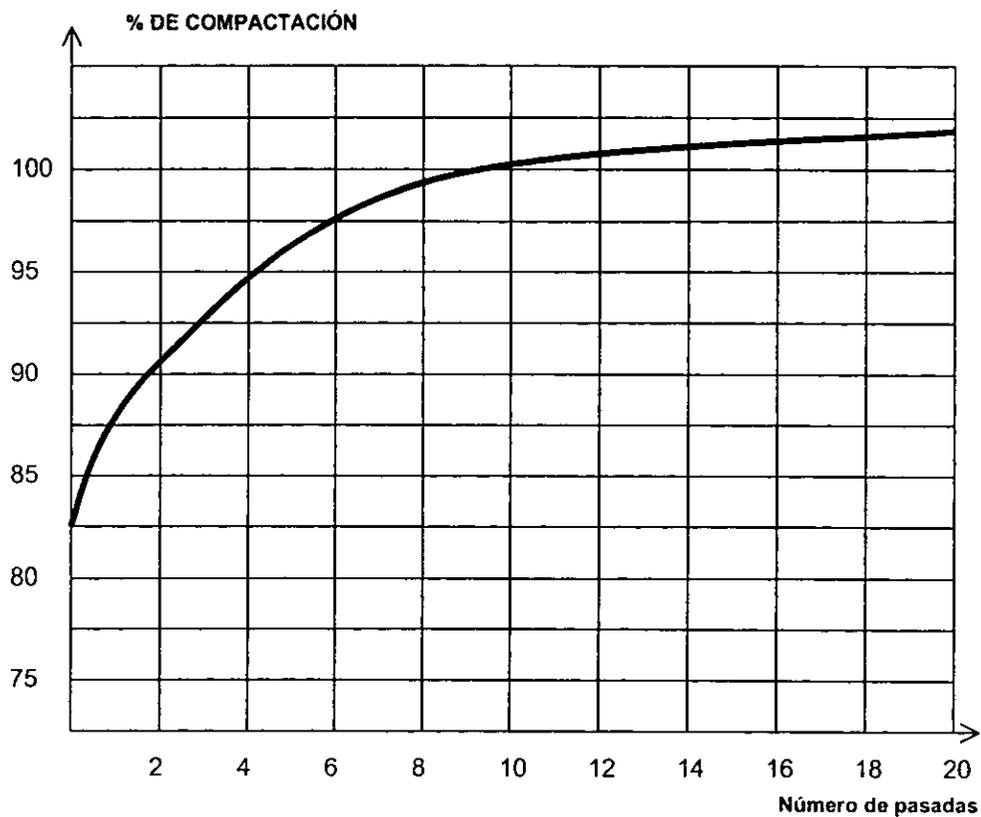
La máxima eficiencia se obtiene entre 3 y 5 km. por hora, a velocidades mayores la eficiencia baja rápidamente y se puede llegar a no obtener la compactación.

III.7. - Espesor de capa.- En el proceso de compactación es de gran importancia el espesor de la capa compactada. Para un determinado suelo, equipo de compactación y requerimiento de la misma, a medida que aumenta el espesor de la capa aumenta el numero necesario de pasadas; sin embargo, por regla general, resulta más económico satisfacer los requerimientos de la compactación cuanto más gruesa sea la capa compactada, por lo que en un principio debería usarse el mayor espesor posible. El espesor de capa por compactar dependerá esencialmente de:

- A). - Tipo de material.
- B). - Humedad en el material
- C). - Tipo de compactador
- D). - Grado de compactación especificado



Gráfica III. a.- De composición granulométrica.



Gráfica III. b.- Relación de número de pasadas - % de compactación.

Capítulo IV.- Selección de compactadores en cuanto a su función.

IV.1.- Selección del compactador más adecuado al tipo de material.

IV.2.- Tamaño de Obra.

IV.3.- Requerimientos Especiales.

IV.- Selección de Compactadores en cuanto a su función.

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

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

- IV.1. - Selección del compactador más adecuado al tipo de material
- IV.2. - Tamaño de la Obra
- IV.3. - Requerimientos especiales

IV.1. - Selección del Compactador mas adecuado al tipo de Material.

En la figura IV. a se muestra en los renglones 4 y 5 los diferentes materiales y su respectivo tamaño en mm. En el renglón 3 se clasifican en cohesivos, (los más finos son cohesivos y los granulares no cohesivos) en los renglones 1 y 2 se indica su uso más frecuente:

1. - Sub - bases, bases y carpetas: siempre materiales no cohesivos (arenas y gravas).
2. - Terracerías: normalmente materiales cohesivos y semicohesivos, a veces no cohesivos.

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

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

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

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

Conclusiones de la figura IV. a.

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

Para suelos cohesivos: Las máquinas de por sí combinan diferentes esfuerzos de compactación. por ejem. rodillos de impacto. Rodillos de pata de cabra vibratorios, etc.

Para suelos no cohesivos: Neumático y rodillo vibratorio (Línea B, Ver figura IV. a).

IV.2. - Tamaño de Obra.

Dependiendo del tamaño de la obra y habiendo ya seleccionado el tipo de compactador adecuado para el material por compactar, se puede determinar el número de compactadores necesarios para cumplir con el plazo estipulado.

IV.3 - Requerimientos Especiales.

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

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

Selección de equipo

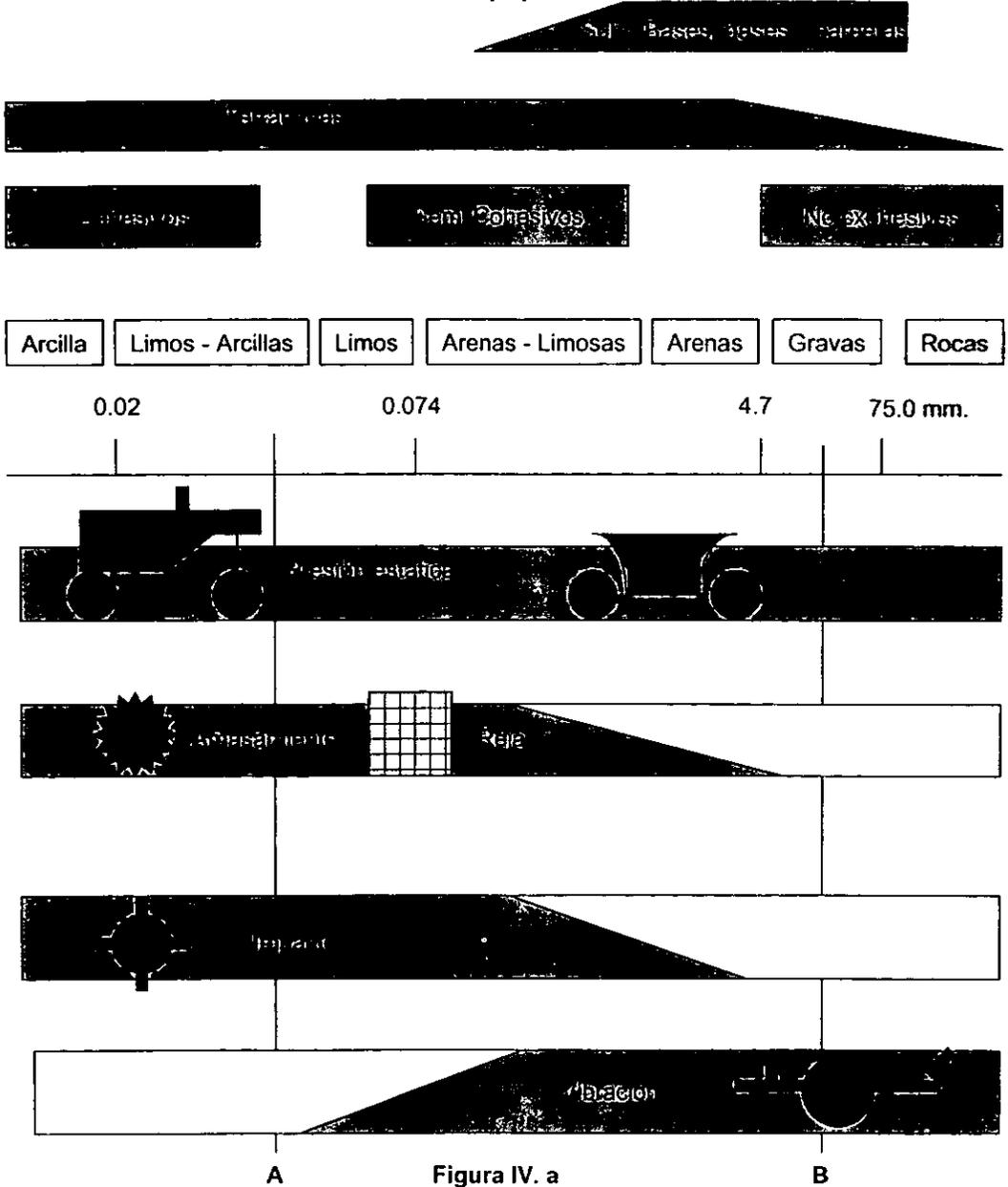


Figura IV. a

Capítulo V.- Solución de problemas en la compactación.

V.- Solución de problemas en la compactación.

¿Que hacer cuando el control nos indica una falla?

Esta pregunta la vamos a contestar por medio de diagramas lógicos, que siguen a continuación, en los que intenta, en forma general, mostrar un camino lógico para un análisis formal.

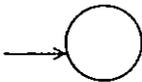
En estos diagramas se usan los siguientes símbolos:



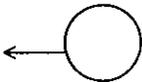
= Un hecho o una acción



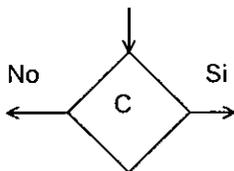
= Una alternativa



= Pasa al punto x



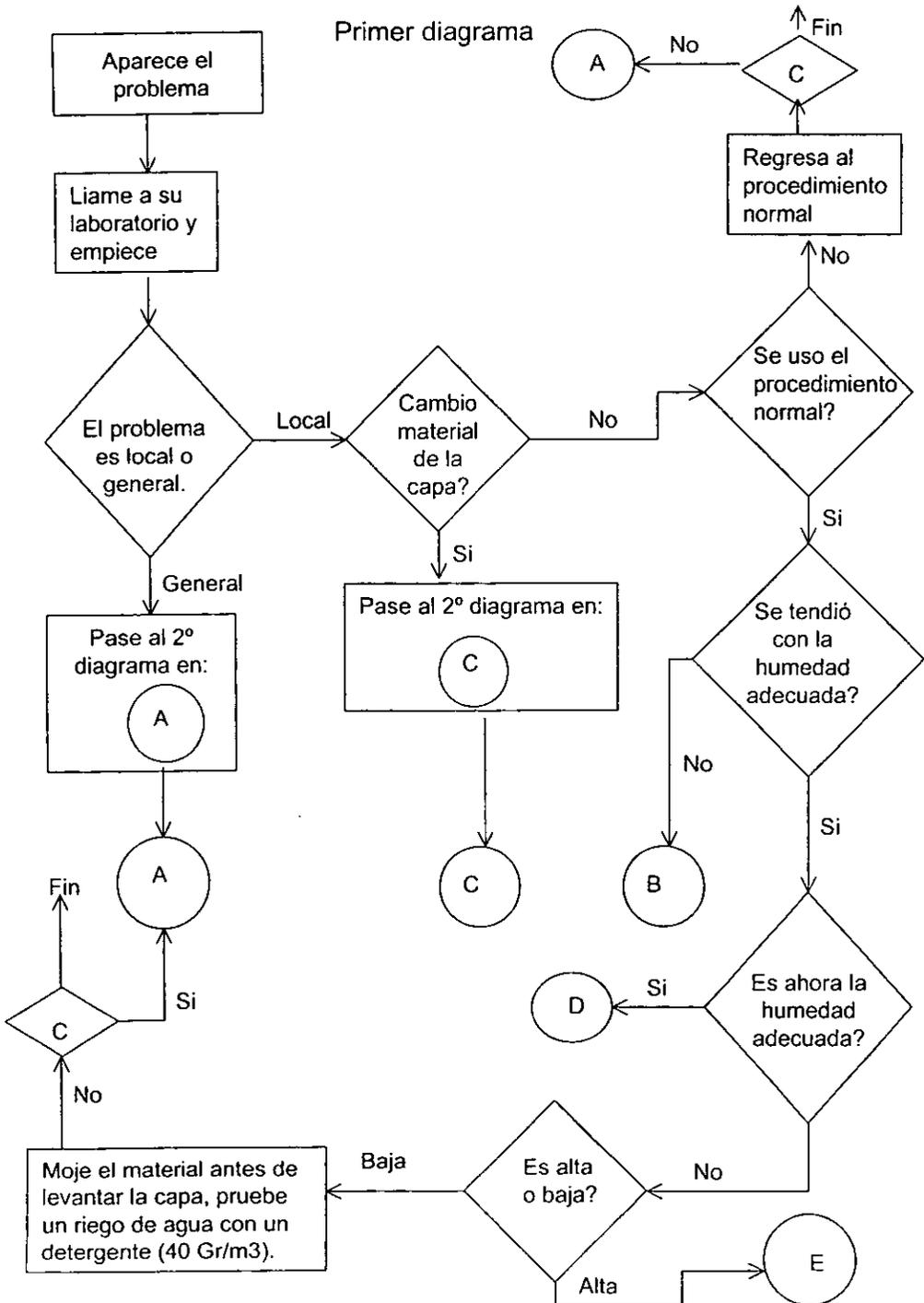
= El punto x



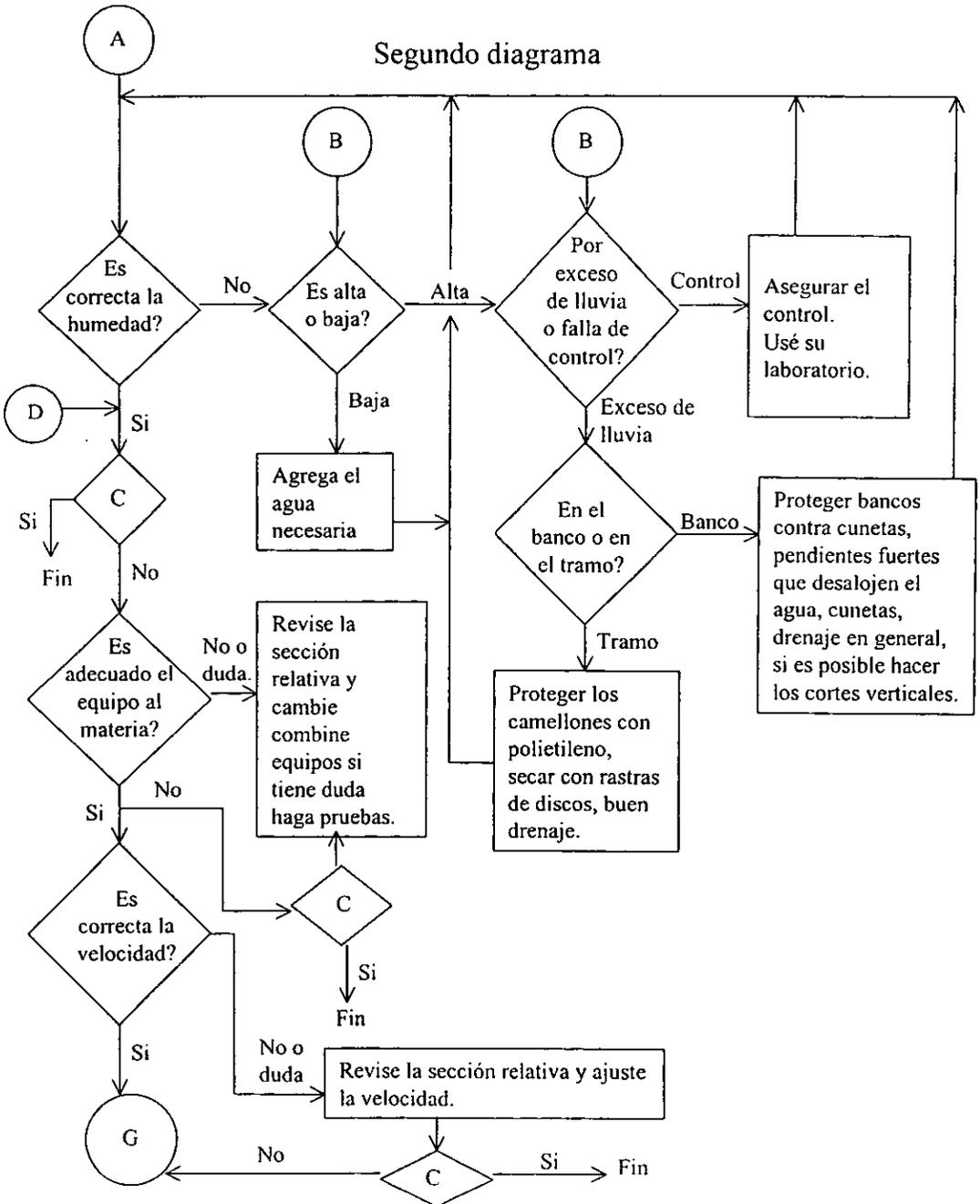
= ¿ Se alcanzó la compactación?

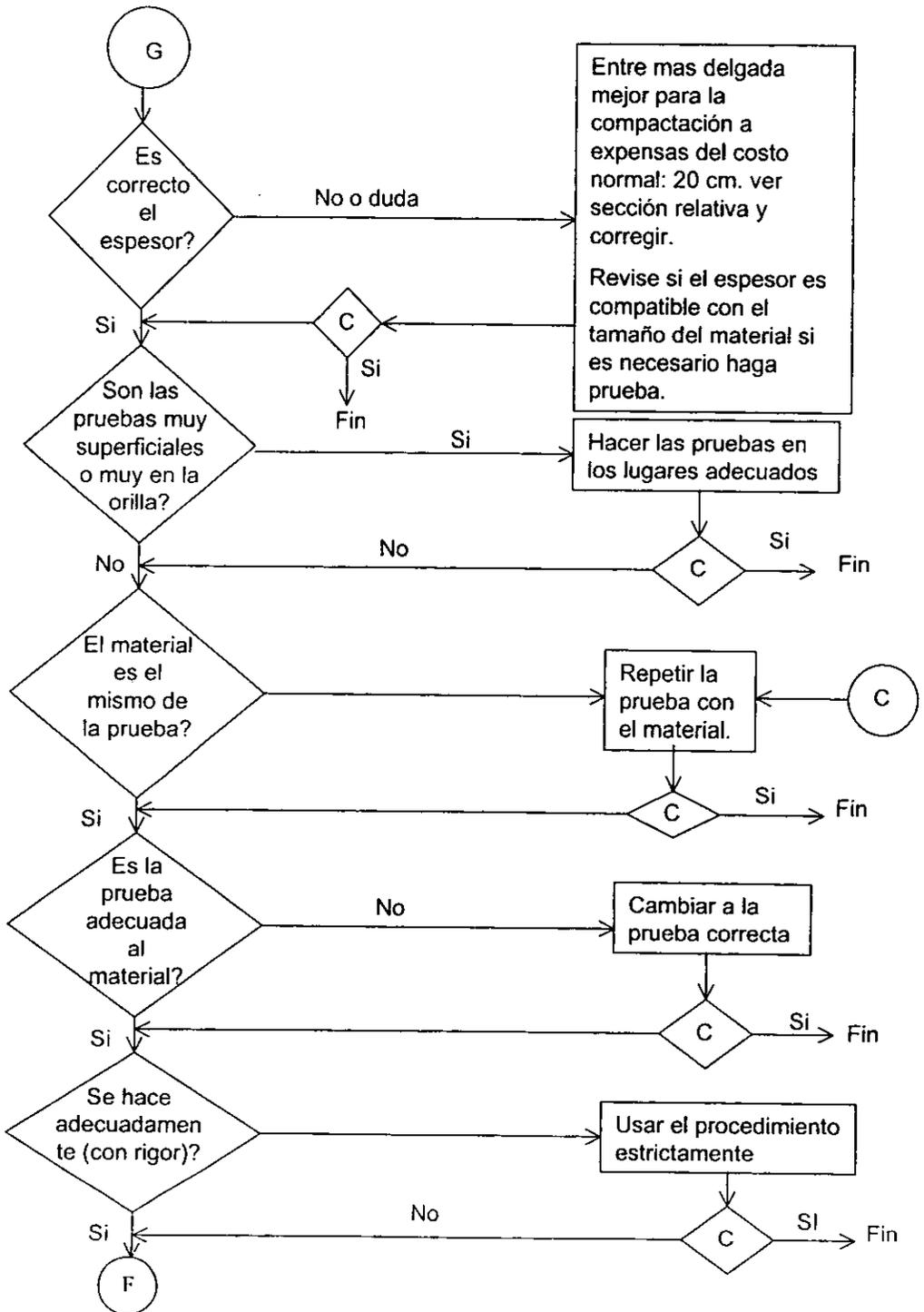
Observar siguientes diagramas:

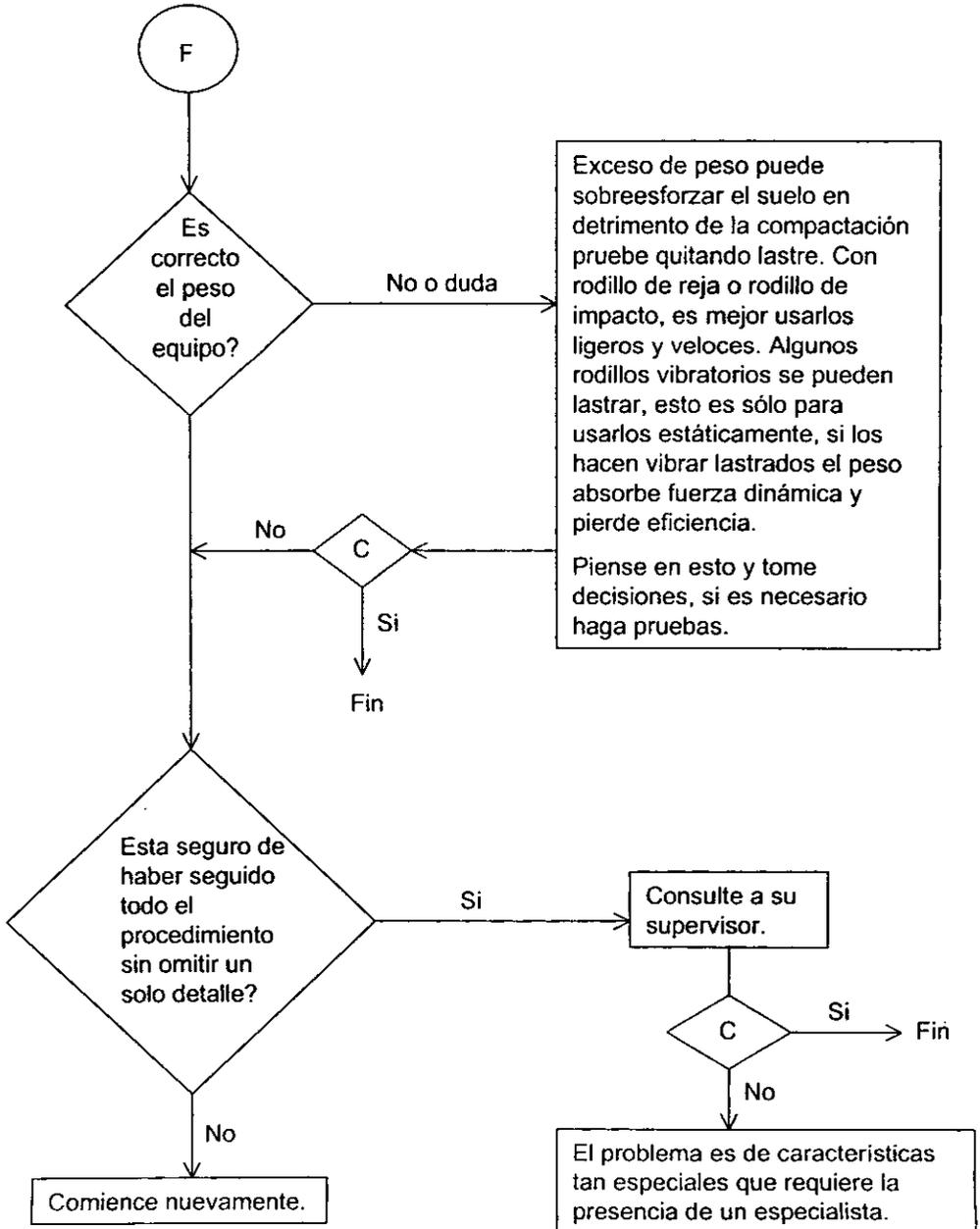
Primer diagrama



Segundo diagrama







Capítulo VI.- Rendimiento del equipo de compactación.

VI.- Rendimiento del equipo de compactación.

Rendimiento.

Para determinar la producción Horaria de un equipo de compactación se debe tomar en cuenta los siguientes factores:

- 1) Ancho compactado por la maquina = A
- 2) Velocidad de operación = V
- 3) Espesor de capa = E
- 4) Número de pasadas para obtener la compactación especificada = N

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

La formula puede escribirse:

$$P = (A \cdot V \cdot E \cdot 10 \cdot C) / N$$

donde:

P = Producción horaria (m³ / h)

A = Ancho compactado por la maquina (m)

V = Velocidad (km / h)

E = Espesor de capa (cm)

N = Número de pasadas

10 = Factor de conversión

C = Eficiencia (0.6 a 0.8)

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

El número de pasadas depende de la energía que el equipo puede proporcionar al suelo (tabla VI. a) página 79.

Ejemplos típicos:

EQUIPO	Profundidad de La capa (cm.)	No. De pasadas	
		Para 90 %	Para 95 %
Rodillo metálico	10 A 20	7 A 9	10 A 12
Neumático ligero	15 A 20	5 A 6	8 A 9
Neumático pesado	Hasta 70	4 A 5	6 A 8
Rodillo de impacto	20 A 30	5 A 6	6 A 8
Rodillo de reja	20 A 25	6 A 7	7 A 9
Pata de cabra vibratoria	20 A 30	3 A 5	6 A 7
Rodillo liso vibratorio	20 A 30	Ver gráfica IV. a	

Tabla VI. a

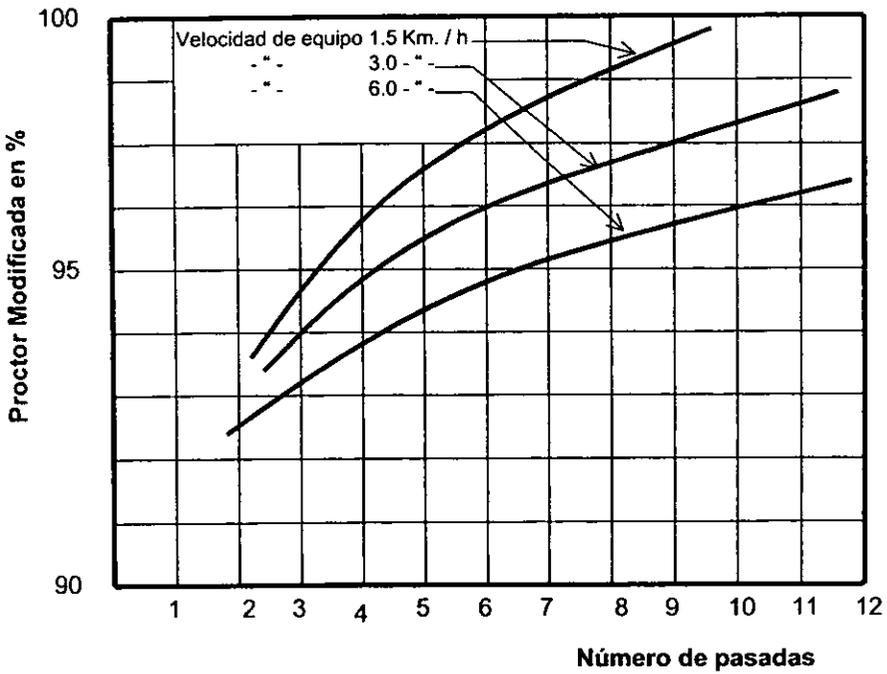
Velocidad de operación.

De la velocidad de traslación del compactador y del número de pasadas dependerá principalmente la producción.

La velocidad esta entre los siguientes valores:

- 1).- Rodillos metálicos y patas de cabra:
Son lentos por naturaleza, entre más rápido mejor, limitados solo por la seguridad. 2 a 3 km por hora es un buen máximo.
- 2).- Rodillos de reja y de impacto:
Entre más rápido mejor, limitado solo por la seguridad, normalmente de 10 a 20 km / h.
- 3).- Rodillos neumáticos:
Entre más rápido mejor, excepto que haya rebotes, lo que puede ocasionar ondulación de la capa, compactación dispereja y desgaste acelerado del equipo. Normal de 4 a 8 km / h.
- 4).- Rodillos vibratorios:
La máxima eficiencia se obtiene entre 4 y 6 km / h, a velocidades mayores la eficiencia baja rápidamente y se puede llegar a no obtener la compactación.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**



Relación entre el grado de compactación y número de pasadas

Equipo: liso - vibratorio

Gráfica VI. a

Capítulo VII.- Planeación de la compactación en un tramo de base para un camino.

VII.- Planeación de la compactación en un tramo de base para un camino.

Para esto veremos un ejemplo:

Compactar un tramo de base de 0.15 m. de espesor. De 6 kilómetros. de longitud a 95 % proctor, para la pavimentación de un camino, se considera la capa base ya tendida y con la humedad adecuada.

- A).- De acuerdo con la tabla "VI. a" página 79, la mejor combinación de equipo es un rodillo vibratorio liso y un rodillo neumático.
- B).- Disponemos de un compactador vibratorio liso de 1.30 m. de ancho, que trabaja a una velocidad de 3.0 km / h. y de un compactador de neumáticos autopropulsado de 9 ruedas, 1.62 m. de ancho que trabaja a una velocidad de 4 km / h. (la eficiencia general para este problema es de 0.62 %), consideramos traslapes entre cada pasada de 0.15 m.

C).- Rendimientos:

C.1.- Compactador vibratorio liso:

De acuerdo con la gráfica VI. a página 80 se requieren:

$$4 + = 5 \text{ pasadas.}$$

Calculo de la producción horaria

$$P = ((1.30-0.15)*4.5*15*10*0.62) / 5 = 96 \text{ m}^3 / \text{h.}$$

C.2.- Para el compactador neumático autopropulsado de 9 ruedas.

De acuerdo a la gráfica VI. a, el número de pasadas es:

$$6 + = 7 \text{ pasadas}$$

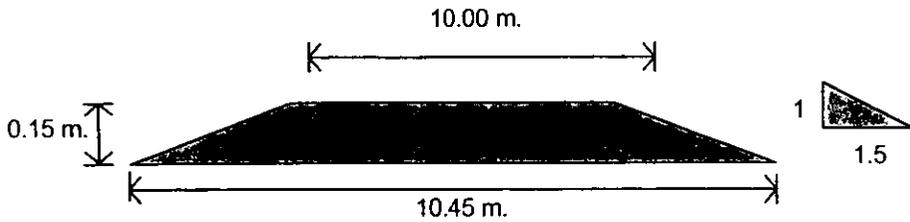
$$P = ((1.62-0.15)*6*15*10*0.62) / 7 = 117 \text{ m}^3 / \text{h.}$$

Rendimiento de los dos compactadores:

$$R = 213 \text{ m}^3 / \text{h.}$$

Dividiendo el tramo total en subtramos de 500 m.

El volumen por subtramo es:



$$((10.00+10.45) / 2) * 0.15 * 500 = 766 \text{ m}^3$$

Horas de compactación * tramo:

$$766 / 213 = 3 + = 4 \text{ horas.}$$

Se trabajarán un turno y un tramo por día. para esto se requieren:

a).- Motoconformadoras de (50 m³ / h)

$$766 / 50 = 15 \text{ horas.}$$

Se necesitan dos motoconformadoras

b).- Pipas de 8 m³, una pipa por hora (el material tiene una humedad de 5 % y una humedad óptima de 12 %).

Volumen de agua:

$$766 (0.12-0.05) = 53 \text{ m}^3$$

Número de viajes:

$$53 / 8 = 6 + = 7 \text{ viajes} = 7 \text{ horas.}$$

Por lo tanto se necesita una pipa

Conclusiones

La compactación es una norma constructiva fundamental, vasta y compleja, la cual depende de varias variables que deben ser motivo de detenido estudio.

La compactación del suelo es una práctica muy antigua cuyos métodos vinieron a racionalizarse hasta la tercera década del presente siglo.

El tamaño y la forma de las partículas de los materiales, el contenido de humedad y el esfuerzo que se aplica son los factores de mayor influencia en la compactación.

La compactación produce esencialmente 3 efectos muy importantes: aumenta la resistencia al esfuerzo cortante, disminuye la compresibilidad y la permeabilidad de los materiales.

Ningún método de compactación es igualmente aplicable para todos los tipos de materiales.

La buena selección del equipo de compactación nos lleva al éxito tanto económico como funcional dentro de una obra.

Las pruebas de laboratorio son Vitales y es la única manera para determinar qué material es utilizable y cómo ha de usarse, para obtener mejores resultados.

Existen diferentes pruebas para determinar, en el laboratorio, especificaciones para normar la compactación.

Un buen control de la compactación nos lleva a resultados satisfactorios.

La meta de la compactación en la construcción es obtener los pesos volumétricos máximos especificados y los contenidos de humedad óptimos adecuados, en el tiempo más corto y al menor costo.

La solución de problemas de compactación a base de diagramas lógicos resulta bastante aceptable, ya que nos van guiando paso por paso sin perdernos hasta llegar a la solución.

Con el desarrollo que ha tenido la tecnología en los últimos años, ya es posible diseñar programas y dar solución a los problemas de compactación, por medio de la computadora.

La buena planeación de un proyecto de compactación, trae como resultado ahorro económico y tiempos cortos de ejecución de obra..

Bibliografía

- La ingeniería de suelos en las vías terrestres.
Ing. Alfonso Rico
- Mecánica de suelos tomo I
Eulalio Juárez Badillo
- Ingeniería de carreteras.
Paul H. Wright
- Movimiento de tierras – Manual de excavación.
Herbert L. Nichols, Jr
- Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones.
George B. Sowers
- Compactación en carreteras y aeropuertos.
Luis Valero Alonso
- Maquinaria y métodos modernos en construcción.
Frank Harris
- Maquinaria para construcción.
David A. Day
- Movimiento de tierras.
Colegio de Ingenieros Civiles
- Mecanica de suelos en la Ingeniería practica.
Karl Terzaghi
- Maquinaria general en obras y movimientos de tierra.
Paul Galabru
- Consideraciones sobre compactación de suelos en obras de infraestructura de transporte.
Instituto Mexicano del Transporte