

4775

UNIOO



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

---

FACULTAD DE INGENIERIA

## *La Compactación en la Construcción*

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

**I N G E N I E R O C I V I L**

P R E S E N T A

**CESAR A. GONZALEZ ROSENBUSH**

MEXICO, D. F.

1 9 7 1



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.



**Universidad Nacional Autónoma de México**

**Facultad de Ingeniería**

*La Compactación en la Construcción*

**T E S I S**

**CÉSAR A. GONZALEZ ROSENBUSH**

**MEXICO, D. F.**

**1971**



Universidad Nacional  
Autónoma de  
México

UNIVERSIDAD DE INGENIERIA  
Exámenes profesionales  
Núm. 40-  
Exp. Núm. 40/214.2/

Al Pasante señor César A GONZALEZ ROSENBUSH  
P r e s e n t e

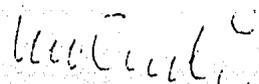
En atención a su solicitud relativa, me es grato transcribir a usted a continuación el tema que aprobado por esta Dirección propuso el profesor Ingeniero Fernando Favela L., para que lo desarrolle como tesis en su examen profesional de Ingeniero CIVIL.

LA CONTRATACION EN LA CONSTRUCCION

- "I Introducción
- II Procedimientos de Construcción y Selección del Equipo.
- III Pruebas y Especificaciones
- IV Métodos de Control
- V Conclusiones."

Ruego a usted tomar debida nota de que en cumplimiento de lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito indispensable para sustentar examen profesional; así como de la disposición de la Dirección General de Servicios Escolares, en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

Muy atentamente,  
"POR LA RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
México, D.F. 11 de Novbre. de 1970  
EL DIRECTOR

  
Ing. Manuel Paulín Ortiz

1970 NOV 14 1970



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA

SR. DIRECTOR GENERAL DE  
SERVICIOS ESCOLARES  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
P r e s e n t e .

Por medio de la presente se hace constar que el alumno, señor \_\_\_\_\_  
GLEZ. ROSENBUCH CESAR ARMANDO de la carrera de INGENIERIA CIVIL de  
esta Facultad, realizó trabajos en las Prácticas de Desarrollo Regional, contados  
a partir del 28 de Septiembre de 1970, y hasta el 6 de  
Abril de 1971, por lo cual se considera que el men-  
cionado señor GONZALEZ ROSENBUCH ha cumplido con el SERVI-  
CIO SOCIAL que obliga la Ley Reglamentaria de los Artículos 4o. y 5o. Consti-  
tucionales relativos al Ejercicio de las Profesiones en el Distrito y Territorios -  
Federales.

Atentamente,

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

EL DIRECTOR,

  
DR. JUAN CASILLAS G. DE L.

JCGL/GPL/SCH

**Esta tesis se desarrolló bajo la dirección  
del maestro**

---

**ING. FERNANDO FAVELA LOZOYA**

**a quien expreso mi profundo agradecimiento**

**A MIS PADRES**

**Dr. César González Díaz**

**Sra. Betty Rosenbush de González Díaz**

**A MI HERMANO**

**José Antonio**

**A MI ESPOSA**

**Sra. Gilda Carmona de González**

**A MI HIJO**

**César Armando**

**A MIS FAMILIARES**

**Con particular reconocimiento a mi tío**

**Dr. Armando González Díaz**

**A MIS MAESTROS**

**A MIS COMPAÑEROS**

**A MIS AMIGOS**

---

## LA COMPACTACION EN LA CONSTRUCCION

# CAPITULO I

## INTRODUCCION

La compactación de los suelos tiene dentro de la ingeniería civil una gran importancia. La necesidad de ejecutarla en forma adecuada se ha expresado repetidamente y desde muy diversos puntos de vista. Por ejemplo, se señala con precisión esta necesidad respecto a algunas prácticas de la ingeniería de caminos al aseverarse - que "en la construcción de una carretera no hay un solo factor -con la posible excepción de las características adecuadas de drenaje- que tenga mayor influencia en las condiciones funcionales del pavimento que una compactación apropiada de los terraplenes, sub-bases, bases y superficies de rodamiento".

En términos generales se estima en la actualidad que una compactación - adecuada en la construcción es incuestionable y es la razón por la que se hace intensa investigación al respecto y se revisan minuciosamente y frecuentemente los procedimientos para su correcta ejecución.

Desde el punto de vista gramatical la palabra compactación resulta de sustantivar el adjetivo compacto que deriva del latín compactus, participio pasivo de compingere que quiere decir unir, juntar, y se aplica a los cuerpos de textura densa, apretada y poco porosa.

Según TSCHEBOTARIOFF compactación se define como "el incremento artificial del peso volumétrico de un suelo por medios mecánicos". Es decir, es el proceso de densificación de los materiales mediante el uso de implementos y maquinaria diversos y resulta principalmente de la expulsión de aire y/o agua de sus masas.

Debe hacerse notar la diferencia que existe entre compactación, antes definida, y consolidación y estabilización. Consolidación es el incremento gradual del peso volumétrico de un suelo por la acción de las fuerzas de gravedad como son el peso propio y el de las estructuras erigidas sobre el mismo, es decir, es un proceso natural en el que el suelo se densifica esencialmente debido a la expulsión de agua de su masa; mientras que por estabilización se entenderá toda modificación artificial de un suelo mediante procedimientos de agregado de productos químicos, biológicos, o lo más común, de otros suelos, con el objeto de mejorar las propiedades que influyen en la conservación de su resistencia al esfuerzo cortante, su volumen y su forma.

La construcción de estructuras de tierra es probablemente tan vieja como el hombre. Ciertamente, el uso de terraplenes de soporte para la transportación es antiquísimo y se estima que aun considerados bajo los patrones actuales la magnitud de muchas obras primitivas de este tipo es impresionante. Sirvan de ejemplo las rampas de arena que fueron construídas para encumbrar los enormes bloques de piedra caliza con las que se erigió hace cerca de cinco mil años la gran pirámide de Keops en Egipto con una altura de ciento cincuenta y tres metros. Los constructores primitivos derivaron de sus experiencias, al notar el mejor comportamiento de los suelos firmes en -

comparación a los sueltos, la necesidad de compactar las masas que integrarían los terraplenes, especialmente los que actuarían como diques o malecones. Así, hay indicios de que tanto en los bordos construidos en China antes de Cristo como en los erigidos por los mexicas en América, en el siglo XV D.C., hubo intentos conscientes de compactación. Sin embargo, los problemas de la compactación en la construcción deben haber sido tratados empíricamente poniéndoles mayor o menor atención de acuerdo con la importancia de la obra por construir. Por otro lado, las evidencias indican que no se hacían esfuerzos especiales para compactar los terraplenes viales ya que las calzadas eran suficientemente flexibles como para no ser dañadas por asentamientos. Por cierto, en tiempos relativamente recientes los terraplenes para líneas ferroviarias eran también construidos simplemente echando tierra suelta que se dejaba asentar bajo su propio peso durante varios años, antes de colocar el balasto de alta calidad.

El asentamiento de los terraplenes sin compactación no significó mayores inconvenientes sino hasta después de iniciado el siglo XX, cuando hizo su aparición el automóvil y, con su rápido desarrollo, creó una demanda creciente de caminos pavimentados. Poco después se hizo evidente que los caminos de concreto construidos sobre terraplenes sin compactar o mal compactados se rompían con facilidad y que los de pavimentos flexibles tenían la tendencia a desnivelarse en exceso. La necesidad de evitar estos inconvenientes, además del auge de la construcción de obras de tierra, fomentó el desarrollo de métodos de compactación que fuesen a la vez eficientes y

económicos; pero fue hasta la tercera década del siglo XX cuando se iniciaron los esfuerzos por racionalizar la compactación en varias partes del mundo.

Las investigaciones realizadas demuestran que ningún método de compactación es igualmente adecuado para todos los tipos de suelos, cosa que condujo al establecimiento de métodos para la especificación y verificación de los trabajos de campo, mediante el uso de patrones de compactación en el laboratorio. A partir de ese momento se observa la tendencia a referir todo trabajo de compactación a esos patrones, independizando hasta cierto punto a la compactación de los requerimientos particulares de la obra, procediendo como si fuese un fin en sí misma, a diferencia de como se hacía anteriormente con base empírica. El objeto de las pruebas de compactación en el laboratorio es permitir la especificación racional y el control de los trabajos de campo. Mediante lo anterior se introdujo como norma constructiva fundamental la compactación de los suelos.

La compactación produce, en términos generales, tres efectos muy importantes:

- 1) aumenta la resistencia al esfuerzo cortante,
- 2) disminuye la compresibilidad y
- 3) disminuye la permeabilidad de los materiales.

En otras palabras, la compactación consiste en aumentar la estabilidad, reducir la deformabilidad y aumentar la capacidad para resistir la erosión interna causa

da por filtraciones, coadyuvando así a que los suelos soporten los efectos externos, - tales como cargas, erosión externa por agua, viento o hielo y otras sollicitaciones.

A su vez la compactación es influida esencialmente por:

- a) el contenido de humedad del suelo, factor de fundamental consideración,
- b) el tamaño y la forma de las partículas que lo integran, que pueden presentar características que ayudan u obstaculizan la compactación,
- c) la energía específica empleada o esfuerzo de compactación, que es el trabajo aplicado sobre el suelo para densificarlo en forma artificial y
- d) la temperatura, que puede, por ejemplo, aumentar el peso unitario de suelos de grano fino compactados en unos 50 o más kilogramos por metro cúbico cuando se eleva de  $0^{\circ}\text{C}$  a  $25^{\circ}\text{C}$ ; o bien, en el caso de mezclas asfálticas, disminuir el esfuerzo de compactación a medida que se le eleva hasta el máximo permisible.

Evidentemente el efecto de la compactación es cuestión de grado y el grado de compactación que debe alcanzar un suelo dado, sometido a un procedimiento de compactación determinado, depende en su mayor parte del contenido de humedad. La humedad ayuda a la compactación en dos formas: provee lubricación que facilita el acomodo de partículas y es agente de enlace de las de los suelos cohesivos, haciéndolos trabajables, plásticos y resistentes al esfuerzo cortante. La compactación máxi

ma se obtiene a un cierto contenido de humedad, conocido como contenido óptimo de humedad (Fig. 1.1); mientras que el procedimiento utilizado para mantener la humedad del suelo cerca del óptimo durante la compactación se conoce como control de la humedad.

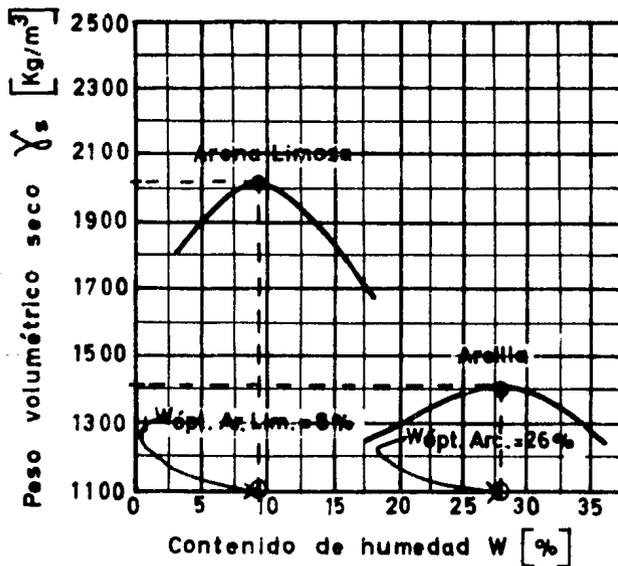


Fig. 1.1. Curvas tipo humedad-peso volumétrico seco de dos suelos compactados según una misma norma.

Aun no se conocen con detalle las relaciones entre el contenido de humedad en el momento en que se construye una obra de tierra, el grado de su compactación y la forma como cambian sus características físicas durante su período de servi-

cio. Los cambios de resistencia, rigidez y permeabilidad que estas estructuras sufren con el tiempo y con las variaciones en su contenido de humedad, requieren mucho mayor atención de la que se les ha dado hasta la fecha; razón por la cual en este trabajo se tratan más bien los procedimientos constructivos que las propiedades en sí de los suelos compactados.

## CAPITULO II

### PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCION Y SELECCION DEL EQUIPO

Los procedimientos de compactación en la construcción consisten en aplicar a los materiales "esfuerzo de compactación" ( $\text{Kg-m por m}^3$  de material), proporcionado por un equipo adecuado. La meta actual es la obtención de los pesos volumétricos máximos especificados en el tiempo más corto y al menor costo. Como regla general se especifican estos pesos volumétricos máximos y en algunas ocasiones el contenido de humedad para compactar; pero casi nunca se especifica el tipo de equipo para un trabajo en particular. Por lo tanto el contratista está en libertad de usar el equipo de su elección y de éste dependerá el éxito económico. De hecho no existen reglas exactas para seleccionar el equipo ya que las variaciones en especificaciones, tipos de materiales, contenidos naturales de humedad, métodos operacionales e implementos y maquinaria disponibles hacen que el problema sea complejo.

Debe hacerse notar que ningún método de compactación puede dar buen resultado sin el equipo apropiado.

Se dispone de varios tipos de compactadores y su uso depende de la clase de material que se va a densificar. Aisladamente de las características de los equipos que se usan todos ellos proporcionan esfuerzo de compactación por medio de las formas

siguientes:

- 1) peso estático
- 2) impacto
- 3) vibración
- 4) acción de amasado

Los compactadores de peso estático son rodillos de superficie, ya sea de rueda de acero lisa o de llanta neumática. Las unidades de acero pueden ser tandem de dos o tres ejes o el de configuración de tres ruedas. Los rodillos de llantas neumáticas se fabrican en gran variedad de tamaños y pesos; se diferencian esencialmente por el tamaño de las llantas.

Los compactadores de impacto son fundamentalmente pisones manuales simples o neumáticos; otros son unidades de salto continuo accionadas por motores de gasolina; otros más se asemejan a los martinetes.

Los compactadores de vibración están esencialmente integrados por rodillos de acero o de llantas de hule, placas, zapatas o tubos con dispositivos especiales para la acción vibratoria.

Los compactadores de acción de amasado son principalmente rodillos apisonadores del tipo de pata de cabra; incluyen también a los de rejilla y a los de huella segmentada.

Existen combinaciones de los tipos de compactadores mencionados.

Con cada tipo de compactador el esfuerzo de compactación varía considerablemente y, observando las características de cada uno de ellos, el esfuerzo que proporcionan puede modificarse por medio de 1) agregarles lastre, 2) cambiar la velocidad o la frecuencia con que operan, 3) alterar el número de pasadas o de impactos que efectúan sobre los materiales y 4) variar el diseño de sus elementos de contacto con los materiales.

Dependiendo del tipo de obra de que se trate en la práctica se encuentran tres grandes grupos de materiales a los cuales según las especificaciones se debe aplicar un esfuerzo de compactación: materiales cohesivos, con cohesión moderada y no cohesivos.

1) Materiales cohesivos. - Son aquellos que presentan una fuerte atracción mutua de sus partículas debida a fuerzas moleculares y a la presencia de agua u otros aglutinantes. En la práctica de la compactación estos materiales están representados principalmente por los suelos arcillosos y las mezclas asfálticas.

a) Procedimientos de compactación para suelos arcillosos. - Cualquiera que sea el procedimiento de compactación empleado, los resultados en un suelo arcilloso dependen principalmente de la energía de compactación (determinada esencialmente por la presión y el área de contacto equipo-suelo, el número de pasadas del equipo y el espesor de la capa compactada) y del contenido de humedad.

El método general consiste en tender el material en capas, con un contenido de humedad cercano al óptimo, seguido por el equipo compactador. Los rodillos - pata de cabra son muy efectivos y se consideran como el mejor instrumento para compactar arcillas. Se obtienen mejores resultados cuando el contenido de humedad es ligeramente superior al límite plástico; pero si es mucho mayor, la arcilla tiende a pegarse al rodillo o éste a hundirse en ella. La acción del rodillo pata de cabra hace progresar la compactación de cada capa del suelo de abajo hacia arriba ya que las patas ejercen la mayor presión en el lecho inferior de la capa; para que esto ocurra el espesor de la capa sin compactar, que suele ser generalmente de 10 a 30 cm, no debe ser muy superior a la longitud de las patas. El proceso de la compactación con rodillo pata de cabra produce dos efectos muy importantes: distribución uniforme de la energía de compactación dentro de cada capa y buen sello en los contactos entre capas sucesivas debido a la escarificación que el rodillo deja para recibir a la siguiente capa. El número necesario de pasadas depende fundamentalmente de las presiones de contacto. La presión nominal de contacto bajo las patas del rodillo se calcula dividiendo el peso total del rodillo entre el producto del número de patas a lo largo de una generatriz por el área de contacto de cada pata. Es evidente que existe una presión de contacto mínima necesaria para compactar eficientemente un suelo dado. Para hacer máxima la productividad de la compactación con rodillo pata de cabra es conveniente que su área de contacto sea lo mayor posible ya que al aumentarla se incrementa el peso volumétrico seco para un número dado de pasadas o reduce el número de ellas necesario para lograr cierto grado de compactación, debiéndose tener cuidado únicamente en mantener la presión de contacto superior a la mínima necesaria.

Se emplean también en la compactación de arcillas rodillos con llantas neumáticas que producen asimismo, como el pata de cabra aunque en menor grado, cierto efecto de amasado; pero aplican a la capa una presión aproximadamente igual a la de inflado del neumático desde la primera pasada, ejerciendo una acción compactiva de la superficie de la capa hacia abajo. El número de pasadas requerido para lograr la máxima compactación con un rodillo de llantas neumáticas en suelos arcillosos depende esencialmente de la presión de inflado, de la carga por rueda, del espesor de la capa y del contenido de humedad.

En áreas reducidas de acceso difícil suelen usarse compactadores manuales.

b) Procedimientos de compactación para mezclas asfálticas. - Las mezclas asfálticas están formadas por materiales pétreos seleccionados por sus características físicas y por asfaltos (rebajados o cementos asfálticos); se emplean principalmente para la construcción de pavimentos flexibles. Su compactación es un problema en el cual no puede fijarse un procedimiento operacional estricto debido al gran número de factores variables que pueden presentarse, tales como la temperatura atmosférica, la de la base o la de la mezcla, solana o nublados, calidad trabajable de la mezcla y otros, que cambian día a día y por lo tanto la seguridad de lograr los resultados deseados se aprende solamente a través de la experiencia.

Un pavimento flexible se construye en varias capas sobre el firme, debiendo ser cada capa sucesiva más resistente, con densificación más alta que la previa. Cualquier falla durante las operaciones de compactación resultará en resistencias

muy por debajo de las diseñadas. La superficie de rodamiento debe ser de agregados finos y asfalto y la más impermeable de las capas para prevenir infiltraciones que pueden debilitar toda la estructura del pavimento.

La compactación de pavimentos asfálticos debe ser rigurosa y uniforme, de tal manera que se<sup>n</sup> estables bajo el tránsito de vehículos, tersos e impermeables y no permitir asentamientos en proporción objetable durante su vida útil. La densificación inadecuada o sin uniformidad produce baja cohesión, inestabilidad y una superficie porosa susceptible a la entrada de aire y agua. Para lograr que las mezclas asfálticas sean estables e impermeables se requiere generalmente que la compactación progrese hasta el punto en el que la relación de vacíos sea menor del 8%, más allá de este punto debe llegarse a un equilibrio entre deformación aceptable bajo tránsito y derramamiento de la mezcla; dicho equilibrio se alcanza normalmente compactando de 98 a 100% del peso volumétrico especificado en el laboratorio, lo que permitirá un adelgazamiento máximo de 2%, considerado como muy aceptable.

El aplanado inicial debe seguir inmediatamente a la operación de extendido o tan pronto como sea posible. Ha llegado a ser una práctica general el usar una máquina de las empleadas para el acabado, del tipo de ruedas de acero lisas, para el aplanado inicial debido a su mejor condición para el junteo longitudinal, su mayor visibilidad para operar y su gran capacidad de carga. En climas cálidos es generalmente necesario retardar el aplanado intermedio y final hasta un marcado enfriamiento de las capas parcialmente compactadas, para evitar agrietamientos y desplazamientos de la mezcla. Siguiendo de inmediato al aplanado final, la superficie de rodamien

to debe comprobarse con una cuchilla recta para verificar si se ajusta a las especificaciones de tersura y, en caso contrario, corregir en ese momento mediante aplanado - cualquier variación mayor. Otras imperfecciones de la superficie, tales como áreas - abiertas, deben corregirse también mientras la mezcla está todavía caliente y que - puede, inclusive, quitarse y reemplazarse fácilmente. El aplanado final debe completarse antes que la temperatura de la mezcla caiga por debajo del punto en el cual el aplanado es inefectivo. Normalmente esta compactación se lleva a cabo con equipo de llantas neumáticas hasta el punto de densificación requerido; sin embargo, para dar una apariencia final muy tersa de la superficie, se practica generalmente un aplanado de acabado con rodillos de acero lisos.

La velocidad de los rodillos a través de las varias etapas de compactación es un factor muy importante en el resultado final. Después del aplanado inicial la velocidad de los rodillos debe aumentarse y se ha comprobado que velocidades hasta - de 8 Km/hr dan buenos resultados.

Pudiendo ser necesario variar el esfuerzo de compactación de acuerdo con el tipo de mezcla que se coloca deben seguirse ciertos principios fundamentales sin - importar la mezcla:

- 1) El aplanado debe comenzar en las orillas y progresar hacia el centro o, donde la carretera se sobreeleva, el aplanado debe iniciarse en el lado bajo y avanzar hacia el alto.

2) Con rodillos de acero, las máquinas deben siempre avanzar sobre la mezcla con la rueda de tracción hacia el material sin compactar.

3) El aplanado inicial debe hacerse a una temperatura tan alta como sea posible (la permisible para la mezcla) y si el material no se densifica apropiadamente a dicha temperatura debe examinarse la composición de la mezcla y hacerle las modificaciones que procedan. El aplanado intermedio suele hacerse con rodillos de llantas neumáticas a temperaturas mayores de  $55^{\circ}\text{C}$  y menores de  $95^{\circ}\text{C}$  para evitar levantamiento y desplazamiento de la mezcla.

4) El aplanado debe variar de tal manera que en los puntos de inversión de dirección no se dejen líneas transversales en el pavimento, por lo que deben hacerse dichas inversiones en sitios predeterminados para los giros.

Numerosas investigaciones, pruebas y mejoras en las especificaciones de pavimentación, métodos y equipo, han tenido lugar en años recientes. Actualmente los contratistas se aprovechan de estos conocimientos que han demostrado que el uso de rodillos de llantas neumáticas pesados, en adición a los rodillos lisos, han permitido aprovechar las altas capacidades de producción de los nuevos pavimentadores, muchos de los cuales pueden manejar la mezcla producida por dos o tres plantas. Quizá la mejora más significativa de la calidad, comprobada en los últimos años en construcción de pavimentos de concreto bituminoso caliente, es el desarrollo y uso de rodillos de llantas neumáticas de alta presión entre el aplanado inicial y el final que se ejecuta con ruedas de acero. Dicho rodillo de llantas neumáticas, además de su propiedad

de lograr un amplio margen de presiones de contacto, incluyendo valores comparables y hasta en exceso al de las llantas de camiones pesados, ha demostrado las siguientes ventajas en la compactación de concreto bituminoso:

a) Densifica con mayor uniformidad la capa que se compacta.

b) La compactación neumática hace un excelente trabajo de sellado de la superficie a la entrada del agua.

c) A velocidades de aplanado comparables, la larga huella oval de la llanta neumática somete a esfuerzo a una área dada de la mezcla por un período de tiempo mayor que la huella de franja transversal de la rueda de acero.

d) Las llantas del rodillo neumático de aplanado liso son capaces de producir un pavimento de superficie tersa con muchos tipos de mezclas, al grado que pueden eliminar la necesidad de los rodillos en tándem.

e) En vista de la capacidad para lograr compactación uniforme en corto tiempo, el rodillo de llantas neumáticas es más efectivo que otros tipos de rodillos para la densificación a temperaturas ambientales cercanas a las más bajas permisibles para el pavimentado con concreto bituminoso cuando está sujeto a rápido enfriamiento.

En términos generales, el esfuerzo de compactación que se aplica a las mezclas asfálticas puede incrementarse 1) aumentando la presión de las llantas (lo que causa además del incremento de peso volumétrico máximo una disminución en el óptimo de contenido de asfalto), 2) aumentando la temperatura de la mezcla al máxi

mo permisible y 3) aumentando el número de pasadas del equipo.

II) Materiales con cohesión moderada. - Están representados fundamentalmente por los suelos arenosos y limosos. En términos generales, para todo método empleado en la compactación de estos materiales las variables que se deben considerar son básicamente el contenido de humedad, el equipo más conveniente, el número de pasadas requerido y el espesor de la capa. Su compactación en capas por medio de rodillos da resultados satisfactorios. El espesor de la capa depende del tipo de rodillo y de la clase de material; el equipo debe seleccionarse considerando principalmente el grado de cohesión del material y la norma o grado de compactación especificados. Los rodillos de llantas neumáticas se adaptan mejor para la compactación de limos y suelos limosos no plásticos y para su mejor aplicación se recomienda que se efectúen de 8 a 10 pasadas por capa de 10 a 15 cm de espesor, ejerciendo cuando menos una presión de 40 Kg por cm de longitud de eje o ancho de llanta; mientras que los rodillos pata de cabra son más efectivos en los suelos plásticos, que requieren generalmente de 8 a 10 pasadas en capas de 25 a 30 cm y con presión de 20-40 Kg/cm<sup>2</sup>.

Cualquiera que sea el tipo del equipo de compactación o el grado de cohesión del suelo, la eficacia del procedimiento de compactación depende en gran parte del contenido de humedad del suelo, especialmente en aquellos casi no plásticos uniformes de grano fino, los cuales no pueden compactarse de ninguna manera a menos que su contenido de humedad sea prácticamente igual que el óptimo.

III) Materiales no cohesivos. - Son materiales granuales cuyas partículas

presentan alta resistencia a deslizarse unas respecto de otras debido a las irregularidades de sus superficies ( formas angulares). A este grupo pertenecen la arena, la grava y roca fragmentada.

Los procedimientos para compactar estos materiales friccionantes son, en orden decreciente de eficiencia: vibración, mojado y rodamiento. En la práctica se hacen combinaciones de ellos para optimizar los resultados.

En compactación vibratoria se emplea una terminología específica:

Peso estático. - Peso total del equipo vibratorio.

Fuerza dinámica o pulsátil. - Fuerza que produce la vibración; puede ser creada por pesos rotativos, reacción hidráulica u otros medios.

Resonancia. - Cuando un vibrador se opera a través de un rango de frecuencias (vibraciones por minuto), con una fuerza dinámica constante, habrá una frecuencia a la cual el suelo y el vibrador se cimbran con mucho mayor fuerza que a cualquiera otra frecuencia, llamada resonancia.

Masa de suelo. - La cantidad de material que está siendo vibrada apreciablemente en un caso dado.

Las vibraciones pueden producirse simplemente al dejar caer pesos grandes desde cierta altura sobre el material; sin embargo, la compactación vibratoria apropiada requiere del equipo especializado citado en páginas anteriores. Los efectos producidos por estos compactadores dependen en gran parte de la frecuencia (Fig. 2. 1).

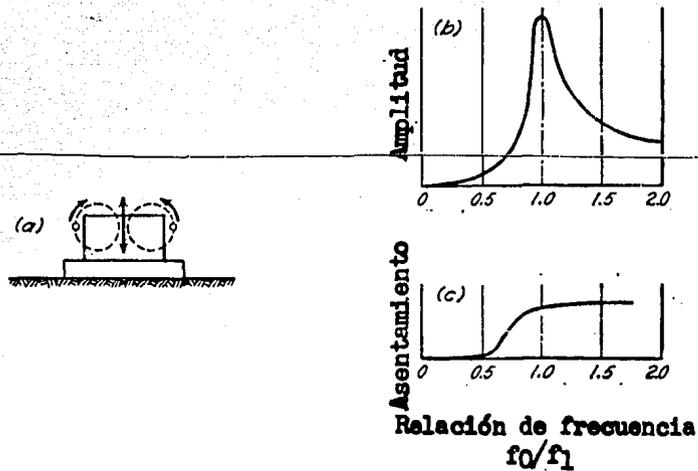


Fig. 2.1. (a) Principio en que se basa el vibrador de suelos; (b) relación entre frecuencia y amplitud de las vibraciones; (c) relación entre frecuencia y asentamiento de la base del vibrador.

Si la frecuencia  $f_1$  de las vibraciones es menor de la mitad de la frecuencia crítica  $f_0$  del suelo, la fuerza pulsante produce poca disminución del volumen; cuando  $f_0 = f_1$ , la disminución de volumen es de 20 a 40 veces mayor que la producida por una fuerza estática equivalente a la pulsátil. La frecuencia a la que debe operar un vibrador para producir la compactación máxima (resonancia) es distinta para cada tipo de suelo, razón por la que se han desarrollado vibradores de frecuencia regulable.

#### RANGO DE FRECUENCIAS DE RESONANCIA DEL SUELO

<u>Tipo de suelo</u>	<u>Vibraciones por min (aprox)</u>
Arena mediana	1100 - 1450
Arena gruesa	1150 - 1500

Arena gravosa	1000 - 1250
Arcilla húmeda	1150 - 1600

La vibración en sí ayuda a las cargas rodantes o estáticas a producir mayores asentamientos; en los suelos granulares la agitación produce un reacomodo de partículas permitiendo a la carga reducir fácilmente los espacios de aire, aumentando así el peso volumétrico seco.

La compactación por mojado se basa en la presión de filtración del agua que rompe los conjuntos inestables de granos. Existen principalmente dos métodos de compactación por mojado:

1.- Se coloca la arena en montículos pequeños a los lados de la superficie de trabajo y se les arrastra hacia el centro con chorros de agua a presiones de unos - 5 Kg/cm<sup>2</sup> formándose un depósito que asemeja un dique.

2.- La superficie de trabajo se anega de tal manera que el agua se embeba en la arena que se ha colocado previamente y escape por la parte inferior del terraplén.

En los dos casos se requieren 1.5 m<sup>3</sup> de agua por m<sup>3</sup> de arena aproximadamente. Debe hacerse notar que el grado de compactación obtenido con estos procedimientos es relativamente bajo; si bien las opiniones relativas a la efectividad compactiva del mojado están aun divididas.

Finalmente conviene mencionar que el empleo de rodillos para compactar

materiales no cohesivos resulta casi inefectivo a menos que estén provistos con dispositivos apropiados de vibración.

~~En términos generales, en la construcción de terracerfas, la compactación~~  
forma parte del ciclo constructivo y por lo tanto está íntimamente ligada a otras operaciones tales como excavación, transporte de materiales, su regado en capas, su procesamiento (humidificación, deshidratación, rompimiento, graduación de partículas, etc.), así como a las actividades subsecuentes para la terminación de la obra y que normalmente deben ajustarse a un método que se ha proyectado; sin embargo, pueden considerarse los siguientes dos métodos generales:

a) Progresivo.- Consiste en regar capas verdaderamente delgadas (hasta unos 12 cm), las máquinas niveladoras y graduadoras siguen a las que riegan el material, entonces el equipo compactador densifica la capa a medida que se avanza en el trabajo; por lo tanto, prácticamente cuando termina el regado la primera pasada de compactación ya ha sido completada; después de otras dos o tres pasadas con una máquina ligera y rápida, puede tenderse la siguiente capa.

b) Por etapas.- Consiste en regar una capa entera, suelta y gruesa (mayor de 30 cm) que, desde luego, no soporta el peso de máquinas grandes y por lo tanto debe correrse primero una o dos veces equipo ligero sin lastre para formar una costra que permita el uso de maquinaria más pesada; después de una o dos pasadas ésta debe lastrarse completamente para obtener el peso volumétrico requerido.

En la práctica se presentan casos en los que deban densificarse masas naturales de suelos y terraplenes ya existentes que no pueden compactarse en capas y, por lo tanto, los procedimientos y los equipos deben seleccionarse en función de la naturaleza de esos suelos y terraplenes ya que para hacer efectiva la compactación el equipo debe actuar principalmente en el interior de sus masas.

Hinca de pilotes.- Por ejemplo, para compactar arena suelta en estratos gruesos un buen procedimiento es el hincado de pilotes que producen vibraciones a gran profundidad, permitiendo reducir la porosidad de la arena de 35 a 45% aumentando la velocidad de propagación de ondas elásticas en el estrato de unos 300 m/seg (valor normal en arena suelta) a unos 1200 m/seg; sin embargo, las capas superiores deben compactarse después usando vibradores de unas 24 ton. Los suelos arenosos con alguna cohesión y los terraplenes cohesivos existentes también pueden compactarse hincando pilotes; empero, la compactación en este caso no es producida por las vibraciones de la hinca sino por la presión estática que producen los pilotes y que reduce los espacios vacíos. El procedimiento es muy efectivo cuando el material se encuentra por encima del nivel freático; por debajo la efectividad disminuye rápidamente a medida que decrece la permeabilidad del material. La hinca de pilotes en limos sueltos o en estratos de arcilla blanda situados por debajo del nivel freático llevan al suelo a un estado semilíquido, razón por la que la hinca de pilotes en estos suelos en lugar de compactarlos los debilita; la compactación de ellos puede llevarse a cabo por drenaje ya sea bombeando aire caliente a través de un sistema de galerías o extrayendo el agua por bombeo desde los estratos de arena acuífera contenidos en la masa del

suelo. Para facilitar la expulsión del agua suelen instalarse drenes de grava y arena, denominados "pilotes de arena", que se aplican sobre todo para compactar terrenos arcillosos sueltos. Los procedimientos de los pilotes de arena consisten en hincar tubos de acero de unos 30 cm de diámetro cuyos extremos inferiores se cierran con discos de acero dispuestos en tal forma que puedan desprenderse fácilmente de los tubos al ser estos retirados de la masa del suelo; cada tubo se hinca hasta la base del estrato y se llena con una mezcla de grava y arena, cerrándolo con una tapa hermética; posteriormente se retiran los tubos inyectando aire a una presión de  $1.8 \text{ Kg/cm}^2$  aproximadamente que mantiene al suelo blando en su posición impidiendo que ocupe antes que la mezcla de grava y arena el lugar dejado por el tubo; finalmente se acelera la consolidación del suelo circundante extrayendo por bombeo el agua que entra en los pilotes de arena.

**Vibroflotación.**— Procedimiento que consiste en el empleo de un vibrador formado por dos cilindros, uno de menor diámetro montado ligeramente excéntrico respecto al otro accionado por un motor de unas 1800 rpm, lo que produce la vibración; el sistema cuenta además con un dispositivo que inyecta agua en la masa de suelo que lo rodea. Primero se introduce el vibrador en el estrato hasta la profundidad que se desea densificar levantándosele después gradualmente; la compactación se produce durante su recorrido hacia arriba a merced del efecto combinado de las vibraciones y del inyectado de agua que lubrica a las partículas del suelo permitiendo su acomodo. El procedimiento proporciona buenos resultados en arena limpia, comprendida dentro de un espacio cilíndrico con diámetro de 2.5 a 3 m; pero su eficacia va disminuyen—

do notablemente conforme la arena va conteniendo mayor cantidad de limo o arcilla.

**Explosivos.**— En estratos gruesos de arena muy suelta se obtienen grados de compactación satisfactorios haciendo estallar pequeñas cargas de explosivos en varios puntos del interior de su masa. Las vibraciones producidas por las explosiones pueden reducir la porosidad de arenas con valor original de 50% hasta un 43%. En el tratamiento de terrenos pantanosos con fines de su compactación se emplean también los explosivos con resultados aceptables.

En resumen, combinando las sugerencias que se han expuesto anteriormente, relativas a los diversos procedimientos de compactación y a los numerosos equipos que se emplean, con la información de las tablas que se presentan a continuación, pueden obtenerse lineamientos generales para reducir la gran variedad del equipo de campo, permitiendo seleccionar razonablemente el más adecuado.

TABLA I

USO DEL EQUIPO DE COMPACTACION

TIPO DE COMPACTADOR		MEJOR APLICACION	MAXIMO EFECTO EN LA CAPA SUELTA (CM)	PESO VOLUMETRICO GANADO EN LA CAPA	PESO MAXIMO (TON)
1	RUEDA DE ACERO	BITUMINOSOS, MATERIALES GRANULARES	10 A 20	PROMEDIO (1)	8
2	TANDEM DE ACERO 2 EJES	LIMOS ARENOSOS; MAYORIA DE MATERIALES GRANULARES CON POCa LIGA DE ARCILLA	10 A 20	PROMEDIO (1)	16
3	TANDEM DE ACERO 3 EJES	MISMOS QUE ARRIBA	10 A 20	PROMEDIO (1)	20
4	3 RUEDAS DE ACERO	MATERIALES GRANULARES O GRANULAR-PLASTICOS	10 A 20	PROMEDIO (1) A UNIFORME	20
5	LLANTA NEUMATICA CHICA	LIMOS ARENOSOS, ARCILLAS ARENOSAS, ARENAS GRAVOSAS, ARCILLAS CON POCOS FINOS	10 A 20	PROMEDIO (1) A UNIFORME	12
6	LLANTA NEUMATICA GDE.	TODOS (SI ES ECONOMICO)	HASTA 60	PROMEDIO (1)	50
7	PATA APISONADORA	ARCILLA ARENOSA, LIMO CON LIGA DE ARCILLA	18 A 30	CASI UNIFORME	20
8	PATA DE GABRA	ARCILLAS, LIMOS ARCILLOSOS, ARCILLAS LIMOSAS, - GRAVAS CON LIGA ARCILLOSA	18 A 30	CASI UNIFORME	20
9	RUEDA DE ACERO SEGMENTADA	PIEDRA TRITURADA, LIMOS, MAT. GRANULARES, (RESTAURACION DE BITUMINOSOS)	18 A 30	CASI UNIFORME	20
10	VIBRATORIO	ARENAS, MAT. GRANULARES, LIMOS ARENOSOS, ARENAS LIMOSAS	8 A 16	UNIFORME	30
11	COMBINACIONES	TODOS LOS MATERIALES	8 A 16	UNIFORME	20

(1) EL PESO VOLUMETRICO DISMINUYE CON LA PROFUNDIDAD

TABLA II

SISTEMA DE CLASIFICACION DE SUELOS Y SELECCION DEL EQUIPO DE COMPACTACION

1	2	3	4	5	6	
DIVISIONES MAYORES	GRUPOS DE SUELOS Y NOMBRES TIPOICOS	COMPRESIBILIDAD Y EXPANSION	CARACTERISTICAS DE DRENAJE	CARACTERISTICAS DE LA COMPACTACION DE CAMPO	EQUIPO MAS ADECUADO	
1	GRAVA Y SUELOS GRAVOSOS	Grava y mezclas grava-arena bien graduadas, poca o nada de finos.	Casi ninguna	Excelente	Excelente	Tractor de oruga, equipo con llantas de hule; *
2		Mezclas grava-arena bien graduadas con liga de arcilla excelente	Muy ligera	Prácticamente impermeable	Excelente	Rodillos apisonadores, equipo con llantas de hule; *
3		Grava y mezclas grava-arena mal graduadas, poca o nada de finos	Casi ninguna	Excelente	Buena a excelente	Tractor de oruga, equipo con llantas de hule; *
4		Grava con finos, grava limosa, grava arcilloso, mezclas grava-arena-arcilla mal graduadas	Casi ninguna a ligera	Mediana a prácticamente impermeable	Buena a excelente	Tractor de oruga, equipo con llantas de hule, rodillos apisonadores; *
5	ARENAS Y SUELOS ARENOSOS	Arenas y arenas gravosas bien graduadas, poca o nada de finos	Casi ninguna	Excelente	Excelente	Tractor de oruga, equipo con llantas de hule; *
6		Arena bien graduada con liga de arcilla excelente	Muy ligera	Prácticamente impermeable	Excelente	Rodillos apisonadores, equipo con llantas de hule; *
7		Arenas mal graduadas, poca o nada de finos	Casi ninguna	Excelente	Buena a excelente	Tractor de oruga, equipo con llantas de hule; *
8		Arena con finos, arenas limosas, arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla mal grad.	Casi ninguna a mediana	Mediana a prácticamente impermeable	Buena a excelente	Tractor de oruga, equipo con llantas de hule, rodillos apisonadores; *
9	SUELOS DE GRANO FINO CONTENIDO POCO O NADA DE MATERIAL DE GRANO GRUESO SUELOS DE GRANO FINO CON BAJA O MEDIANA COMPRESIBILIDAD LIMITE LIQUIDO < 50	Limos (inorgánicos) y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas con ligera elasticidad	Ligera a mediana	Mediana a pobre	Buena a pobre; es esencial un estricto control	Rodillos de llanta de hule
10		Arcillas (inorgánicas) de baja a mediana plasticidad arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres.	Mediana	Prácticamente impermeable	Mediana a buena	Rodillos apisonadoras.
11		Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad	Mediana a alta	Pobre	Mediana a pobre	Rodillos apisonadores
12	SUELOS DE GRANO FINO CON ALTA COMPRESIBILIDAD LIMITE LIQUIDO < 50	Suelos finos arenosos y limosos micáceos ó diatomáceos, limos elásticos	Alta	Mediana a pobre	Pobre o muy pobre	-----
13		Arcillas (inorgánicas) de alta plasticidad, arcillas grasosas.	Alta	Prácticamente impermeable	Mediana a pobre	Rodillos apisonadores
14		Arcillas orgánicas de mediana a alta plasticidad	Alta	Prácticamente impermeable	Pobre a muy pobre	-----
15	SUELOS ORGANICOS FIBROSOS CON MUY ALTA COMPRESIBILIDAD	Turba y otros suelos pantanosos altamente orgánicos	Muy alta	Mediana a pobre	La compactación no es practicable	
APENDICE	CONCRETOS BITUMINOSOS	Agregados y Asfalto	Casi ninguna	Prácticamente impermeable	Excelente	Rodillos de llantas neumáticas, rodillos de rueda de acero lisos.

\* Los compactadores vibratorios también son adecuados.

La economía de la compactación depende fundamentalmente de los procedimientos que se emplean. Estos deben satisfacer los deseos tanto del contratista como del contratante en la ejecución de los trabajos con el máximo de eficiencia, en el tiempo especificado y al menor costo posible. En una situación ideal en la que las especificaciones son convenientes para el contratista, las condiciones del suelo son las mejores y el equipo que se ha seleccionado es el adecuado y está en su mejor condición mecánica, el trabajo puede aun resultar un fracaso físico y financiero si el contratista no maneja estos elementos básicos en la forma más ventajosa.

La pregunta inmediata es qué equipo debe usar el contratista de tal manera que asegure una compactación adecuada al costo más bajo posible. El contratista debe realizar el estudio correspondiente para determinar la maquinaria que proporcionará el costo más bajo por  $m^3$  compactado.

Producción. - La producción horaria de un compactador se calcula con la siguiente fórmula:

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

P = Producción horaria ( $m^3/hr$ )

A = Ancho del elemento compactador del equipo (m)

V = Velocidad a que se desplaza el compactador (Km/hr)

E = Espesor de la capa (cm)

N = Número de pasadas requeridas

10 = Factor de conversión

C = 0.8 a 0.6 = coeficiente de reducción por traslapes, vueltas, etc.

Ejemplo:

$$A = 2.25 \text{ m}$$

$$V = 9.6 \text{ Km/hr}$$

$$E = 15 \text{ cm}$$

$$N = 4$$

$$P = \frac{2.25 \times 9.6 \times 15}{4} \times 10 \times 0.7$$

$$P = 568 \text{ m}^3/\text{hr}$$

Si el costo horario de un compactador fuera de \$ 171.20, el costo de compactación sería:

$$\text{Costo} = \frac{\$ 171.20/\text{hr}}{568 \text{ m}^3/\text{hr}} = \$ 0.30/\text{m}^3$$

PRUEBAS Y ESPECIFICACIONES

Para obtener la granulometría apropiada, el contenido de humedad y el esfuerzo de compactación en las obras deben seguirse ciertas especificaciones al ejecutarlas. El ingeniero debe determinar a través de algunos análisis estándar de laboratorio las propiedades que deberán tener los materiales. Es obvio que estas pruebas son vitales y, desde los puntos de vista económico y de seguridad, no pueden ser subestimadas; son la única manera para determinar qué material a la mano es utilizable y cómo ha de usarse para obtener mejores resultados.

Justo como hay especificaciones para cada equipo existe una serie de pruebas específicas fijadas para tomar decisiones en relación con los materiales utilizables y, en términos generales, la secuela de estas pruebas de laboratorio es como sigue:

- 1º) Preparación de la muestra
- 2º) Procedimiento de ensaye
- 3º) Cálculo y representación gráfica de resultados

Existen tres tipos fundamentales de pruebas de laboratorio:

- a) Por impactos

- b) Por carga estática
- c) Por acción de amasado

Pruebas por impactos.— Son el procedimiento de prueba generalmente usado para establecer las relaciones humedad-peso volumétrico seco propias de un material. Consisten en compactar el material en capas, cada una de las cuales se densifica con cierto número de golpes uniformemente distribuidos de un pisón con peso, dimensiones y caída libre dados. A este tipo pertenecen las pruebas Proctor cuyo equipo fundamental consiste de un molde cilíndrico y un pisón, siendo el procedimiento general el siguiente: se obtiene por cuarteo una muestra de suelo la cual se prepara y se coloca en el molde cilíndrico en varias capas mediante un cucharón, aplicando a cada capa un esfuerzo de compactación uniforme dejándole caer el pisón de peso conocido un número especificado de veces y desde una altura constante. Una vez procesada la última capa, la cual deberá sobrepasar la altura del molde, se retira el collarín (Ver figura 3.1.) y se enrasa la superficie a la altura del molde mediante una regla de acero con el fin de obtener un volumen conocido de muestra  $V$  (en  $m^3$ ); el material compactado se saca del molde y se pesa para conocer el peso  $P_w$  (en Kg) de la muestra húmeda y de esta manera el peso volumétrico húmedo  $\gamma_w$  (en  $Kg/m^3$ ) =  $P_w/V$  (1); la muestra se seca y se pesa nuevamente determinándose el peso  $P_s$  (en Kg) de la muestra seca para finalmente obtener el contenido de humedad  $W$  (en %) =  $\frac{(P_w - P_s)}{P_s} \times 100$  (2) y el peso volumétrico seco  $\gamma_s$  mediante las siguientes relaciones:

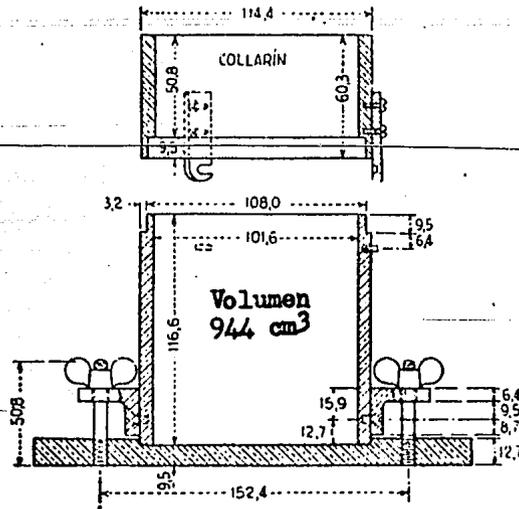


Fig. 3.1.- Molde tipo Proctor para compactación de suelos (también ASTM y AASHO).  
Cotas en mm.

$$\gamma_s \left( \text{en } \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{P_s}{V} \quad (3),$$

Despejando  $P_s$  de la ec. (2):

$$\frac{W}{100} = \frac{P_w}{P_s} - 1; 1 + \frac{W}{100} = \frac{P_w}{P_s}; \therefore P_s = \frac{P_w}{1 + \frac{W}{100}} \quad (4),$$

sustituyendo (4) en (3):

$$\gamma_s = \frac{P_w / \left(1 + \frac{W}{100}\right)}{V}; \gamma_s = \frac{P_w}{V + V \frac{W}{100}}$$

dividiendo numerador y denominador entre  $V$ :

$$\gamma_s = \frac{\frac{P_w}{V}}{1 + \frac{W}{100}}$$

y finalmente tomando en cuenta (1), se obtiene

$$\gamma_s = \frac{\gamma_w}{1 + \frac{W}{100}} \quad (5).$$

Repetiendo el procedimiento varias veces e incrementando el contenido de humedad entre cada uno de ellos, de 1.5 a 3% (según el tipo de suelo), a fin de obtener pesos volumétricos secos para unos cinco diferentes contenidos de humedad, es posible obtener una curva humedad-peso volumétrico seco como la que se muestra en la figura 3.2. La gráfica indicará que existe un contenido de humedad  $W$  óptimo tal

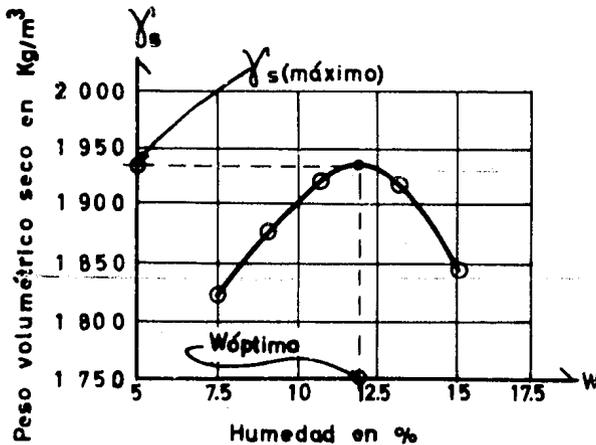


Fig. 3.2.-Curva típica humedad-peso volumétrico seco.

que permite obtener un  $\gamma_s$  máximo. PROCTOR llamó a estos valores "contenido óptimo de humedad" y "peso volumétrico seco máximo", probando así la importancia del agua en el proceso de compactación de un suelo.

Si se ensayan de esta manera diferentes suelos se obtienen curvas como las mostradas en la figura 1.1 de la Introducción.

Originalmente esta prueba era un tanto imperfecta en la reproducción del ensaye ya que influye mucho la acción del operador, razón por la que fue estandarizada como la AASHO T 99-57 (Prueba Proctor estándar) definida bajo las siguientes condiciones:

$$P \text{ (peso del pisón)} = 2.5 \text{ Kg}$$

$$H \text{ (altura de caída)} = 30.5 \text{ cm}$$

$$N \text{ (número de capas)} = 3$$

$$G \text{ (número de golpes por capa)} = 25$$

y por lo tanto una energía específica de compactación (por unidad de volumen) - -

$$E = \frac{P \times H \times N \times G}{\text{vol. muestra compt. (V)}} ; E_{pe} = \frac{2.5 \times 30.5 \times 3 \times 25}{944} = 6.1 \frac{\text{Kg-cm}}{\text{cm}^3}$$

El criterio de estandarización de esta prueba respeta los resultados de la Proctor original eliminando el factor personal al seguirse la secuela descrita anteriormente.

Asimismo tenemos estandarizada la prueba AASHO T 180-57 (Prueba Proctor modificada) que tiene especificaciones más rígidas que la Proctor. Su objeto es aumentar la energía de compactación para obtener pesos volumétricos más altos y se defi

ne bajo las siguientes condiciones:

$$P = 4.54 \text{ Kg}$$

$$H = 45.7 \text{ cm}$$

$$N = 5$$

$$G = 25$$

y por lo tanto una energía específica de compactación (por unidad de volumen) - -

$$E_{p_m} = \frac{4.54 \times 45.7 \times 5 \times 25}{944} = 27.5 \frac{\text{Kg-cm}}{\text{cm}^3}$$

Las dos pruebas tienen como limitación el diámetro de las partículas del material que se ensaya; el máximo diámetro es el de la malla Núm. 4 (4.76 mm), pero aceptan partículas hasta de 19 mm en suelos con más de 50% de partículas retenidas en la malla Núm. 200 (0.074 mm). Además estas pruebas dan resultados inciertos cuando se practican con materiales no cohesivos.

El uso de las pruebas Proctor estándar o Proctor modificada depende solamente de la importancia de la estructura que ha de compactarse. Como podrá notarse la única diferencia entre las dos pruebas es el uso de un pisón más grande dejado caer desde una mayor altura en la prueba modificada. Esto resulta en una mayor energía de compactación y, como se muestra en la figura 3.3, en un peso volumétrico seco mayor y en un contenido óptimo de humedad más bajo para un mismo material dado.

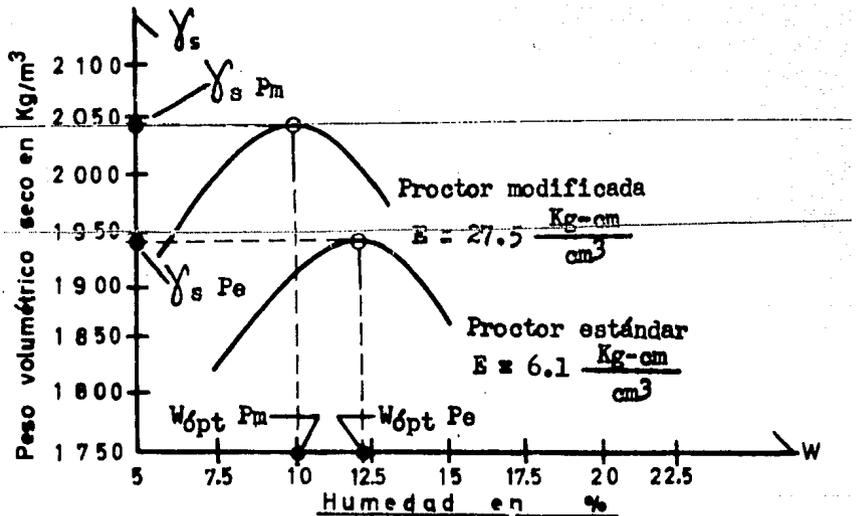


Fig. 3.3.- Comparación de curvas de compactación de laboratorio (Proctor estándar y Proctor modificada).

La prueba Proctor modificada se desarrolló para responder a los requisitos de peso volumétrico más alto para aeropuertos, presas y otras grandes obras que se vienen realizando desde la segunda guerra mundial.

A través de estas pruebas se establecen entonces especificaciones fijando que el material se debe compactar a un determinado porcentaje del peso volumétrico seco máximo y contenido óptimo de humedad de la prueba Proctor estándar (o modificada); por ejemplo: un relleno consistirá de material compactado de tal manera que alcance un 90% del peso volumétrico seco de la Proctor estándar para muestra de cilla arenosa dentro de  $\pm 5\%$  del óptimo de humedad.

En resumen, los pesos volumétricos secos que se obtienen al compactar

suelo por medio de impactos dependen de la energía empleada; cuando ésta se aumenta se obtiene un incremento de peso volumétrico seco y al mismo tiempo un contenido óptimo de humedad más bajo. El incremento de peso volumétrico seco está también en relación con las características de cada suelo. Se ha demostrado también que si la energía se mantiene constante y la relación de diámetro del pisón al espesor de la capa compactada también se conserva constante, la curva humedad-peso volumétrico seco no varía aunque se cambien las dimensiones del molde.

Pruebas por carga estática. - Estas pruebas tienden a semejar en el laboratorio el tipo de compactación que se obtiene en el campo con los rodillos lisos o los neumáticos, es decir, la compactación que va de arriba hacia abajo. La forma en que opera dicha densificación, mediante la lubricación proporcionada por el agua, es semejante a la compactación por impactos.

En general, la compactación por carga estática en el laboratorio consiste en aplicar el material una presión específica durante cierto tiempo, mediante un pisón que cubre toda el área de un cilindro de compactación. La energía de compactación se puede modificar haciendo variar la presión que se aplica al material, el tiempo de aplicación, el tamaño del molde o el número de capas.

Una de las pruebas de este tipo de mayor empleo es la Porter estándar cuyo objeto es determinar el peso volumétrico máximo que puede alcanzar el material - así como la humedad óptima a la que deberá hacerse su compactación. Consiste en - colocar el material con un cierto contenido de humedad en tres capas dentro de un mol

de cilíndrico de compactación de 15.75 cm de diámetro y 20.32 cm de altura, golpeando cada capa con una varilla metálica por 25 veces; a continuación se compacta todo el espécimen aplicando carga uniforme y lentamente hasta alcanzar una presión de  $140.6 \text{ Kg/cm}^2$  en un tiempo de 5 minutos y que deberá mantenerse durante 1 minuto; inmediatamente, en el minuto siguiente, se retira lentamente la carga. Si al llegar a la carga máxima no se humedece la base del molde, la humedad del espécimen es inferior a la óptima y deberá prepararse una nueva muestra incrementando su contenido de humedad y repitiendo el ensayo; el material alcanza su humedad óptima cuando se inicia el humedecimiento de la base del molde al llegar a la presión de  $140.6 \text{ Kg/cm}^2$ . Se determina entonces el volumen del espécimen y se obtiene su  $\gamma_w$ , se seca para determinar finalmente su  $\gamma_s$ .

Esta prueba está limitada a los materiales que pasen totalmente la malla de 25.4 mm. Se practica también en los suelos finos en los cuales las pruebas por impactos son inefectivas o sean aquellos materiales carentes de cohesión.

Pruebas por acción de amasado.— Estas pruebas tienen por objeto la reproducción en el laboratorio de especímenes de campo, particularmente los obtenidos con rodillos pata de cabra. En términos generales, consisten en compactar el material en capas, sujetando a cada una a cierto número de aplicaciones de carga con un pisón que produce presiones que varían gradualmente de cero a cierto valor máximo y luego en sentido contrario. La energía de compactación no puede cuantificarse en la forma simple de la compactación por impactos; pero puede modificarse variando uno

o más de los siguientes factores: fuerza máxima de apisonado, número de pisonadas - por cada capa, número de capas, área del pisón y tamaño del molde.

No se ha desarrollado un patrón de compactación por amasado en el laboratorio. El tipo de compactación por amasado de mayor uso es el llamado Harvard - miniatura cuyo procedimiento y equipo se describen con detalle en los textos especializados (Ref. 15 de la Bibliografía).

Estas pruebas tienen su mejor aplicación en suelos con alta cohesión para - los que se obtiene mayor aproximación que usando pruebas por impactos, como se muestra en la figura 3.4.

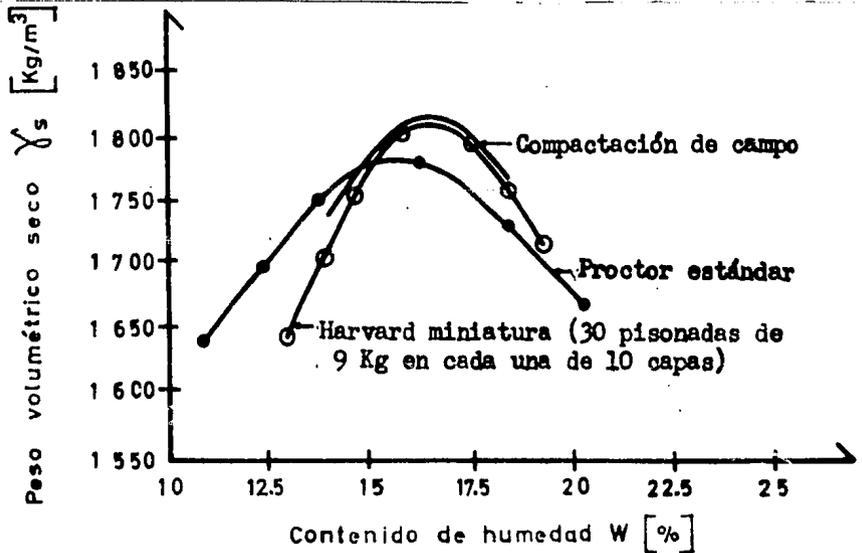


Fig. 3.4.- Comparación de curvas de compactación; las de laboratorio - (Harvard miniatura y Proctor estándar) y la de campo (con rodillo pata - de cabra de gran presión nominal y rodillo neumático).

Una prueba específica para superficies bituminosas muy importante es el método Marshall de evaluación de la estabilidad del concreto asfáltico que ha sido ampliamente aceptado. Consiste en compactar en el laboratorio especímenes de la mezcla usando diversas cantidades de asfalto. Se determina el valor de flujo, que es la deformación expresada en milímetros bajo la técnica de carga especificada, y se determina también la estabilidad, que es la carga expresada en kilogramos que actúa sobre el espécimen. Los valores de peso volumétrico se calculan antes de la prueba y se computan el total de vacíos en la mezcla y el porcentaje de agregado.

Los requerimientos de estabilidad de mezclas asfálticas para carreteras varían de 140 Kg por capa de asfalto hasta 680 Kg para caminos de tránsito pesado. Oficialmente se han fijado estabilidades de 225 Kg mínimo con flujo máximo de 4 mm para 100 psi ( $7 \text{ Kg/cm}^2$ ) de presión de llanta y 450 Kg mínimo con flujo máximo de 5 mm para 200 psi ( $14 \text{ Kg/cm}^2$ ).

Existen además una serie de pruebas específicas in situ que se tratan en el capítulo siguiente (Métodos de Control) ya que son propiamente métodos para llevar a cabo el control de la compactación y no para establecer su especificación.

Las especificaciones, establecidas por medio de las pruebas de laboratorio, son el medio de comunicación entre el que diseña una obra y el que la ejecutará; tenderán a lograr condiciones óptimas para el conjunto de las propiedades de la estructura que se ha de compactar, propiedades tales como homogeneidad, alta resistencia al esfuerzo cortante, baja permeabilidad, baja compresibilidad y cierta flexibilidad.

Las especificaciones se fijan después de considerarse variables como el suelo específico del lugar, el material de relleno disponible dentro de una distancia de acarreo - económica, la diferencia entre las relaciones humedad-peso volumétrico de laboratorio y de campo, los varios tipos de equipo disponibles para la preparación del relleno, la velocidad y número de pasadas del equipo compactador, el espesor de las capas y otras.

Los contratistas encuentran normalmente cuatro categorías de especificaciones de compactación para sus licitaciones:

i) "Solamente el método".- Estas especificaciones son arcaicas y han caído en desuso. Describen en detalle el método de cómo debe lograrse la compactación; pero no especifican los resultados. En la actualidad "solamente el método" no garantiza el adecuado peso volumétrico ni el contenido de humedad apropiado; meramente presume que el método producirá resultados. Tales especificaciones impiden el uso de equipos modernos, reducen la eficiencia y algunas veces producen compactación inadecuada.

ii) "Método y resultados".- Estas especificaciones usadas frecuentemente por organismos oficiales son mejores que las de "solamente el método" ya que debe lograrse un peso volumétrico aceptable. Sin embargo los contratistas están todavía obligados a usar cierto tipo de equipo en una manera específica y esto puede ser también ineficiente.

iii) "Método sugerido y resultado final".- Estas especificaciones parecen

las más razonables para la ejecución de los trabajos de compactación . La empresa - contratante ofrece asesoría sugiriendo el método, dejando en libertad al contratista - experimentado de hacer uso de su experiencia, mientras que guía al contratista menos conocedor, obligándolos solamente en los requerimientos de peso volumétrico y - contenido de humedad apropiados.

i v) "Solamente resultados".- Estas especificaciones , invocadas por muchos contratistas de prestigio, se prefieren a las especificaciones mencionadas en los incisos i e ii; sin embargo tienen la desventaja de que no se ofrece asesoría mientras que se demandan resultados.

## CAPITULO IV

### METODOS DE CONTROL

En el capítulo anterior se comentaron los métodos principales para el establecimiento de las normas de compactación. En el presente capítulo 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 citadas normas.

Los principios fundamentales de la compactación en el campo y en el laboratorio son idénticos y cualitativamente los factores que la afectan en el laboratorio tienen su equivalente en el campo, por ejemplo, número de golpes - número de pasadas. En el laboratorio se establece como debe usarse y compactarse un material - mientras que el control en el campo consiste en verificar si se está usando y compactando en la mejor forma. ¿Cómo sabe el ingeniero 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 - bajo la dirección de agentes responsables. Entonces, a medida que el trabajo progresa ellos deben inspeccionar lo realizado para asegurarse que continuamente se ajuste a las especificaciones que se han establecido. Previamente pueden hacerse también -

los llamados terraplenes de prueba mediante los cuales se determina la forma en que deberá procederse para llevar la especificación correcta a la obra definitiva.

La especificación muestra la manera de hacer ensayos con varias combinaciones de partículas de suelo y contenidos de humedad para llegar a un máximo de peso volumétrico seco bajo un esfuerzo de compactación económico dado que se efectuará mediante los compactadores en el campo y si la compactación de campo es hecha cuidadosamente el resultado será un duplicado de la hecha en el molde de prueba.

El grado de compactación  $G_c$  (expresado en %) que ha de lograrse en el lugar es la relación entre el peso volumétrico seco  $\gamma_s$  (campo) obtenido con el equipo in situ y el peso volumétrico seco máximo de laboratorio  $\gamma_s$  (máx. de lab.) y se expresa según la siguiente fórmula :

$$G_c = \frac{\gamma_s \text{ (campo)}}{\gamma_s \text{ (máx. de lab.)}} \times 100$$

debiéndose indicar con respecto a qué prueba de laboratorio se obtuvo el  $\gamma_s$  (máx. de lab.). Así, por ejemplo, se recomienda un  $G_c$  de 90 ó 95% respecto de la prueba Proctor estándar y dicho valor está en función de la importancia de la estructura que ha de compactarse.

Los suelos compactados a diversos contenidos de humedad para una profundidad dada de suelo densificado tendrán un contenido óptimo de humedad que de-

pende esencialmente de la presión de contacto equipo-suelo y del número de pasadas efectuadas durante el proceso. Los pesos volumétricos obtenidos en el campo para un contenido de humedad constante son afectados principalmente por el número de pasadas del equipo. La relación entre el número de pasadas y el peso volumétrico de campo es similar a la obtenida en el laboratorio e idealmente el mejor equipo para compactar cualquier obra en particular es aquel que logre la compactación deseada con el menor trabajo. Por lo general en la construcción pesada se usa un máximo de 6 a 10 pasadas completas del equipo; un número mayor resulta antieconómico (Ver Fig. 4.1).

El número de pasadas requerido para una compactación adecuada está también en función de la presión de contacto del equipo. A mayor presión se logra mejor densificación con menor número de pasadas y por lo tanto la tendencia actual es el uso de equipo que ejerza mayores presiones de contacto sobre el material. Este procedimiento es satisfactorio a medida que el contenido de humedad del material se controla de acuerdo con la presión que ejerce el equipo. El control de las presiones de contacto es extremadamente importante. Del uso de altas presiones de contacto resultan pesos volumétricos mayores y contenidos óptimos de humedad de campo disminuidos (Ver Fig. 4.2); pero algunos suelos limosos, si se compactan en el lado húmedo del óptimo, requieren presiones de compactación relativamente bajas, lo que es especialmente cierto cuando se usan rodillos pata de cabra ya que los compactadores de alta presión pueden meramente batir el suelo dando por resultado pesos volumétricos bajos.

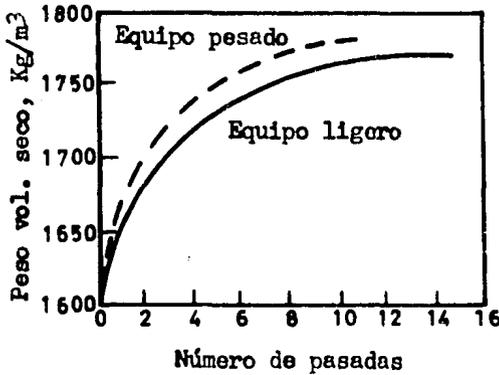


Fig. 4.1.- Efecto del número de pasadas sobre el peso volumétrico seco en una arcilla.

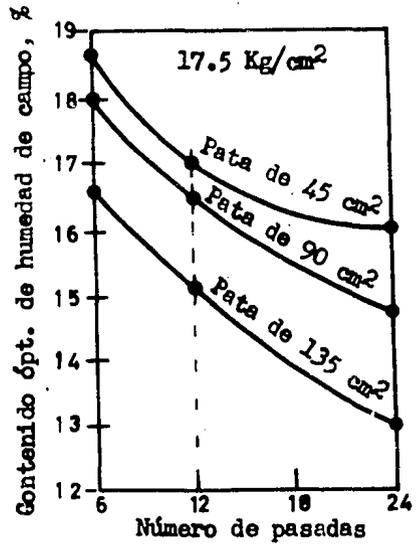


Fig. 4.2.- Efecto del tamaño de la pata compactadora y el número de pasadas sobre el contenido óptimo de humedad de campo.

Los contenidos óptimos de humedad que resultan de la compactación de campo pueden o no ser los mismos que aquellos obtenidos por las pruebas estándar de laboratorio. Como una regla general el contenido óptimo de humedad de campo será ligeramente mayor que los valores de pruebas estándar obtenidos en el laboratorio. Muchos especialistas en suelos trabajan basados en el principio de que el óptimo de laboratorio es el mejor contenido de humedad al cual ha compactarse el suelo en el campo; esto da resultados que son suficientemente exactos para muchas obras de rutina; sin embargo, en algunos casos puede ser ventajoso practicar una serie de pruebas de compactación de campo para determinar la relación entre los óptimos de laboratorio y de campo.

Para obtener una estimación aproximada del contenido de humedad - en mezclas de suelos cohesivos puede practicarse la siguiente prueba elemental: ama sar una muestra de suelo tan apretadamente como sea posible, formando una bola de 4-5 cm de diámetro; colocar la bola entre los dedos pulgar, índice y medio y apretar; si la bola se rompe proyectando fragmentos más bien de tamaño uniforme, el suelo - está cerca del contenido óptimo de humedad; si la bola se aplasta sin romperse el con tenido óptimo de humedad está excedido. Por otro lado, si es difícil o imposible - amasar el suelo haciendo la bola, la muestra está obviamente por debajo del conteni do óptimo de humedad.

Básicamente el procedimiento para las pruebas humedad-peso volumé- trico seco de campo consiste en sacar cuidadosamente una muestra de material com- pactado y determinar su peso húmedo, el contenido de humedad y el volumen de la - cavidad de la cual se extrajo el material. Específicamente la muestra se saca de una área de 10-15 cm de diámetro usando una cuchara y una barreta adecuadas para escar bar toda la profundidad de la capa que se está probando; la cavidad debe ser tan uni forme como sea posible teriéndose cuidado de retener todo el material extraído y co locarlo en una cazuela; esta muestra se pesa para determinar su peso volumétrico hú- medo, se seca y se pesa de nuevo para determinar el contenido de humedad y el peso volumétrico seco. A continuación se determina el volumen de la cavidad midiendo la cantidad de un material de peso conocido que se requiere para llenarla. Frecuente- mente se usa para este fin agua en el "método de balón de agua" en el cual ésta se - bombea dentro de un balón de hule colocado en la cavidad; arena, en el "método del

cono de arena" en el que ésta, uniforme y seca, debe vertirse en la cavidad por medio de un recipiente calibrado desde una altura especificada; bajo ciertas condiciones también puede usarse el "método de reemplazo de aceite", utilizando uno de alta densidad y vertiéndolo en la cavidad desde una probeta graduada.

Aunque a estos métodos se les ha dispensado aceptación casi universal, tienen algunas desventajas. Para asegurar la exactitud necesaria debe determinarse el volumen de la cavidad con aproximación al  $\text{cm}^3$ . Cuando el hueco preparado es demasiado pequeño se aumenta la posibilidad de error. Aun más, la medición con arena - puede variar hasta 5% en un día como resultado solamente de los cambios de humedad. El empleo del método de balón con agua requiere de la preparación de un hoyo apropiadamente conformado, liso, para reducir la posibilidad de huecos no llenados por el balón. La prueba de reemplazo con aceite debe usarse solamente en suelos de baja permeabilidad; de otra manera la filtración del aceite por las paredes y fondo de la cavidad producirá mediciones de volumen demasiado grandes.

Quizá la mayor desventaja de todos estos métodos, con todo, es el hecho de que son consumidores de tiempo; usándolos se requieren cuando menos tres horas para completar apropiadamente las pruebas humedad-peso volumétrico de campo. Por esta razón constantemente se están evaluando nuevas técnicas como intentos para obtener rápidamente comprobaciones exactas sin afectar al relleno.

Los métodos más prometedores desarrollados hasta ahora son las pruebas

nucleares de humedad-peso volumétrico. Se emplea un nuevo instrumento nuclear portátil capaz de determinar tanto peso volumétrico como contenido de humedad durante la compactación. Consiste en una caja cuadrada de 25 x 25 x 5 cm de acero inoxidable cuyo dispositivo nuclear incorpora radio-D-berilio y que se coloca descansando sobre la superficie del suelo en donde irradia rayos gama y neutrones hacia el material que los absorbe parcialmente y parcialmente los refleja; los reflejados pasan a través de tubos Geiger-Müller y se leen en un contador de rayos reflejados estando las lecturas relacionadas con curvas de calibración. El método completo requiere usualmente menos de diez minutos, no afecta al material en el lugar, reduce la apreciación personal característica de los métodos convencionales, pueden practicarse pruebas en agregados de tamaño grande así como en bases de caminos y sobre materiales congelados, ahorra dinero a la larga debido a su mayor velocidad y a su estricta calidad de control, elimina un número mayor de personal entrenado e interfiere menos en las operaciones de compactación. Las únicas limitaciones son las precauciones normales que deben observarse cuando se manipulan materiales radioactivos y el hecho de que algunas veces se obtienen lecturas falsas en suelos orgánicos y en materiales con alto contenido de sales. Como una evidencia de la confiabilidad y rapidez de tales dispositivos gran número de empresas los usan actualmente para el control de la compactación. En los Estados Unidos de Norteamérica, por ejemplo, se usan dispositivos móviles para obtener gráficas continuas de humedad-peso volumétrico a medida que se desplazan sobre los materiales.

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 compactado en el campo; si la resistencia a la penetración es razonablemente cercana en ambos casos se han alcanzado entonces los resultados deseados (ya que la resistencia a la penetración está en función del grado de compactación y de la humedad); si no, habrán de alterarse el resultado de campo y los procedimientos de compactación.

Se han propuesto además varios procedimientos rápidos para el control de la compactación cuyos resultados son sólo aproximados. Uno de estos procedimientos, de los más satisfactorios, es el método de HILF que permite determinar con rigor el grado de compactación in situ y calcular con aproximación suficiente la diferencia entre el contenido óptimo de humedad de laboratorio y el contenido de humedad de compactación de campo, cualquiera que sea el patrón de laboratorio usado para la verificación. La descripción detallada de este método se encuentra en los textos especializados (Refs. 9 y 11 de la Bibliografía).

Como un método de control y ayuda para localizar y corregir deficiencias en la compactación así como partes demasiado húmedas se emplea con frecuencia, una vez terminada la compactación normal, el aplanado de prueba que se efectúa por medio de unas cuantas pasadas con un rodillo pesado de prueba equipado con llantas neumáticas grandes. Cuando se especificó adecuadamente y cuando la humedad del suelo está dentro de los límites del óptimo un aplanado de este tipo corregirá deficiencias de la compactación; cuando el suelo está demasiado húmedo indicará esta con-

dición y permitirá corregirla durante el proceso. Si el contenido de humedad está en el lado seco de los límites apropiados para la compactación el aplanado de prueba da una falsa sensación de seguridad debido a que la capa se ve firme y dura; pero a medida que la humedad aumenta la capa pierde resistencia drásticamente o se compacta más bajo la acción de las cargas durante el uso. El aplanado de prueba, como se dijo, es una excelente ayuda para corregir las deficiencias y para localizar materiales con humedad excesiva; pero no puede reemplazar a una buena inspección ni a las pruebas convencionales para el control durante la construcción.

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES

I.- La compactación de los suelos es una práctica muy antigua cuyos métodos vinieron a racionalizarse hasta la tercera década del presente siglo.

II.- La compactación es una norma constructiva fundamental, vasta y compleja, la cual depende de muchas variables que deben ser motivo de detenida consideración.

III.- Permanentemente se hace investigación tecnológica relativa a los muy diversos factores que intervienen en la compactación.

IV.- 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.

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

VI.- Ningún método de compactación es igualmente adecuado para -

todos los tipos de materiales.

VII.- Los procedimientos de compactación en la construcción pueden ordenarse de acuerdo con los tipos de materiales en tres grupos: para materiales cohesivos, para materiales con cohesión moderada y para materiales no cohesivos.

VIII.- La compactación de pavimentos flexibles y mezclas asfálticas es un problema en el cual los procedimientos operacionales están sujetos a factores variables que pueden presentarse, tales como las condiciones meteorológicas, temperaturas de las mezclas y de las bases y otros.

IX.- Ningún método de compactación puede dar buen resultado sin el equipo adecuado.

X.- De una buena selección del equipo depende el éxito económico y funcional de la compactación.

XI.- Haciendo caso omiso del tipo de máquinas que se usan, todas ellas entregan el esfuerzo de compactación por cualquiera de las cuatro formas siguientes: peso estático, impacto, vibración y acción de amasado.

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

XIII.- Existen muchas pruebas de laboratorio y sus resultados tienen

por objeto normar la compactación a través de las especificaciones .

XIV.- Las especificaciones, derivadas de las pruebas de laboratorio, son el medio de comunicación entre el que diseña una obra y el que la ejecutará .

XV.- Los principios fundamentales de la compactación en el laboratorio y en el campo son idénticos y desde el punto de vista cualitativo los factores - que la afectan en el laboratorio tienen su equivalente en el campo.

XVI.- Existen diversos métodos de control de la compactación que - consisten en pruebas específicas en el lugar y tienen por objeto verificar las especificaciones fijadas en el laboratorio.

XVII.- De un buen control depende que la compactación se lleve a cabo correctamente.

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

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- A.A.S.H.O. American Association of State Highway Officials. Standard Specifications for Highway Materials. 8th Ed. Washington, D. C. 1961.
- 2.- AGUIRRE M., L. Apuntes de clase del curso de Pavimentos. Fac. de Ingeniería. UNAM. México. 1970.
- 3.- A.S.T.M. American Society for Testing Materials. Compaction of Soils. Special Technical Publication Num. 377. Philadelphia, Pa. 1964.
- 4.- BERTRAN, G.E. y LABOUGH, V.C. Soil Tests. A.R.B.A. American Builders Association. Technical Bulletin Num. 107. Washington, D. C. 1964.
- 5.- CASAGRANDE, A. y HIRSCHFED, R. Investigation of Stress Deformation and Strength Characteristics of Compacted Clays. Harvard Soil Mechanics Series -- Num. 61. Cambridge, Mass. 1960.
- 6.- Compaction Theory, Application and Economics. 50-61. Sales Training Division. Caterpillar Tractor Co. USA. 1968.
- 7.- Handbook of Compactionology. Road Machinery Division. BROS Incorporated. Minneapolis, Minn. 1964.
- 8.- MORRIS, M. D. Earth Compaction. Construction Methods and Equipment. McGraw Hill Book Co., Inc.. New York 1961.
- 9.- MARSAL, R. J. y RESENDIZ, D. Compactación de Suelos Arcillosos. Propiedades Mecánicas de Suelos Arcillosos Compactados. Cap. 8 Fundamentos del Diseño y Construcción de Presas de Tierra y Enrocamiento. Instituto de Ingeniería. UNAM. México. 1968.
- 10.- Especificaciones Generales de Construcción. 3ª Ed. Secretaría de Obras Públicas. México. 1964.

- 11.- SABORIO U., J. y ZARATE A., M. Estudio, Experiencias y Comparación de Algunos Métodos de Control Rápido de la Compactación y la Humedad en Terraplenes. Secretaría de Obras Públicas. México. 1964.
- 12.- SIMPSON, B. Apuntes de clase de los cursos de Mecánica de Suelos I y II. Fac. de Ingeniería. UNAM. México. 1969-70.
- 13.- TSCHEBOTARIOFF, G. P. Soil Mechanics, Foundations and Earth Structures.- McGraw Hill Book Co. Inc. New York. 1953.
- 14.- TERZAGHI, K. y PECK, R. B. Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley & Sons, Inc. 10th Printing. New York. 1958.
- 15.- WILSON, S. D. Suggested Method of Test for Moisture Density Relations of Soils Using Harvard Compaction Apparatus. Procedures for testing soils. ASTM. Philadelphia, Pa. 1958.
- 16.- YODER, E. J. Principles of Pavement Design. John Wiley & Sons, Inc. New York. 1959.