



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**“EQUIPO DE COMPACTACIÓN”**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**EDGAR CASTRO SANTIAGO**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERO CIVIL**

**DIRECTOR: ING. FEDERICO ALCARAZ LOZANO**



**CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D.F.**

**ENERO 2006**



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.

## **AGRADECIMIENTOS**

**Doy gracias a Dios por todas las bendiciones hechas a mi persona.**

**A mis Padres por que son mí ejemplo en la vida, por su continuo esfuerzo y dedicación, pues a ellos les debo lo que soy y lo que seré.**

**A mi Abuelita por ser mi mayor consejera**

**A mis hermanos Elizabeth, Miguel, Omar y Ángeles, por ser mi mayor apoyo, y por que siempre contaré con ellos.**

**A mi familia.**

**A mis Amigos por todos los momentos que hemos vivido y los que vendrán.**

**A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería, por que son una parte fundamental de mi vida profesional.**

**A mis Profesores que han contribuido a mi formación profesional y personal, a lo largo de estos años.**

**Un agradecimiento especial al Ing. Federico Alcaraz, por su guía, consejos y por brindarme el apoyo para la realización de este trabajo.**

**“NO ES TAN MALO EL CAER COMO EL PERDER  
LA VOLUNTAD DE VOLVERSE A LEVANTAR”**

**URSUS**

**CUANDO MUERA SOBRE MI TUMBA MIS AMIGOS ESCRIBIRÁN “AQUÍ  
YACE UN SOÑADOR”, MIS ENEMIGOS DIRÁN “AQUÍ YACE UN LOCO”,  
PERO JAMÁS ALGUIEN SE ATREVERÁ A ESCRIBIR “AQUÍ YACE UN  
HOMBRE QUE NO LUCHO POR SUS IDEALES.**

**ÁLVARO OBREGÓN**

**“EL TRIUNFO NO ESTA EN VENCER SIEMPRE,  
SINO EN NUNCA DESANIMARSE”**

**NAPOLEÓN**

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN.</b>	1
<b>I. COMPACTACIÓN.</b>	3
I.1. DEFINICIÓN.	3
I.2. PROPÓSITO E IMPORTANCIA.	4
I.3. PRUEBAS DE COMPACTACIÓN.	5
I.4. MÉTODOS DE CONTROL.	12
<b>II. TRABAJO DEL EQUIPO DE COMPACTACIÓN.</b>	22
II.1.A. COMPACTACIÓN POR PRESIÓN ESTÁTICA.	22
II.1.B. COMPACTACIÓN POR IMPACTO.	23
II.1.C. COMPACTACIÓN POR VIBRACIÓN.	24
II.1.D. COMPACTACIÓN POR AMASAMIENTO.	26
II.2. COMPACTACIÓN CON AYUDA DE ENZIMAS.	27
<b>III. EQUIPO DE COMPACTACIÓN.</b>	28
III.1. RODILLOS METÁLICOS.	30
III.2. RODILLOS NEUMÁTICOS (SOBRE LLANTAS).	35
III.3. RODILLOS PATA DE CABRA.	43
III.4. RODILLO DE REJA.	44
III.5. RODILLO DE IMPACTO (TAMPING ROLLER).	47
III.6. RODILLO VIBRATORIO.	50
III.7. RODILLO PATA DE CABRA VIBRATORIA.	53
<b>IV. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA COMPACTACIÓN.</b>	55
IV.1. CONTENIDO DE HUMEDAD.	55
IV.2. GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL.	56
IV.3. NÚMERO DE PASADAS.	59
IV.4. PESO DEL COMPACTADOR.	60
IV.5. PRESIÓN DE CONTACTO.	60
IV.6. VELOCIDADES DE OPERACIÓN.	61
IV.6.1. RODILLOS METÁLICOS Y PATAS DE CABRA.	61
IV.6.2. RODILLOS DE REJA O DE IMPACTO.	61
IV.6.3. RODILLOS NEUMÁTICOS.	61
IV.6.4. RODILLOS VIBRATORIOS.	61
<b>V. SELECCIÓN DE COMPACTADORES EN CUANTO A SU FUNCIÓN.</b>	62
V.1. TIPO DE MATERIAL.	62
V.2. TAMAÑO DE OBRA.	65
V.3. REQUERIMIENTOS ESPECIALES.	65

---

<b>VI. REGLAS A SEGUIR EN CASO DE TENER PROBLEMAS CON LA COMPACTACIÓN.</b>	<b>66</b>
<b>VII. SELECCIÓN DEL EQUIPO DE COMPACTACIÓN EN CUANTO AL RENDIMIENTO Y AL COSTO DE LA COMPACTACIÓN.</b>	<b>71</b>
VII.1. RENDIMIENTO.	71
VII.2. ESPESORES DE CAPA Y NÚMERO DE PASADAS.	73
VII.3. VELOCIDAD DE OPERACIÓN.	74
VII.4. COSTOS.	75
VII.5. EJEMPLOS.	77
<b>VIII. EL CONCEPTO DE MODULO DE RESILIENCIA EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS. EL CASO DE LOS SUELOS Y MATERIALES GRANULARES.</b>	<b>85</b>
<b>IX. CONCLUSIONES.</b>	<b>87</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.</b>	<b>90</b>

---

## **INTRODUCCIÓN**

La palabra “compactación” resulta de sustantivar el adjetivo “compacto”, que deriva del latín “compactus”, participio pasivo de “*compingere*” que quiere decir unir, juntar.

Recordemos los caminos de China, la Vía Apia, los *Sacbé* de los mayas. Los constructores de esos caminos reconocieron la importancia que tiene la compactación en la resistencia y durabilidad de sus obras. Quizás, al principio, la compactación se realizaba con pisonos o con rodillos de piedra empujados por hombres o animales.

En la actualidad se han desarrollado equipos de compactación de alta producción a bajo costo y esta tendencia continúa pues cada vez la carga en los caminos es más pesada y más intensa.

Hasta hace pocos años se podía contar con la compactación hecha por las unidades de transporte lo que se llamaba “Compactación con el paso obligado del equipo de construcción” y por aplanadoras casuales, para estabilizar los terraplenes, de modo que retuvieran su forma y soportaran las cargas que se colocaran sobre ellos.

La compactación de los suelos debe hacerse de la forma más adecuada, ya que, es el factor que tiene mayor influencia en las condiciones de funcionamiento de rellenos, terraplenes, sub.-bases, bases y superficies de rodamiento.

Se desprende de lo anterior, que la vida útil de una obra, en la que interviene la compactación, dependerá en gran parte del grado de compactación, el cual deberá ser estrictamente controlado.

La realización de proyectos cada vez más ambiciosos y de programas más agresivos ha originado una intensa y constante evolución del equipo de compactación.

Se han introducido mejoras, tales como: poderosos sistemas hidráulicos, sensores electrónicos confiables, diseños más funcionales, mayor versatilidad en su uso, transmisiones más rápidas, potentes motores, etc., las cuales se han traducido en una mayor producción de los equipos, a costos más bajos.

Los grandes equipos de carga, acarreo y tipo de material, han obligado a los fabricantes de equipo de compactación a diseñar máquinas compactadoras capaces de balancear al tiro con la compactación, para evitar interferencia de actividades y pérdida de tiempo, lo que da por resultado un proyecto antieconómico.

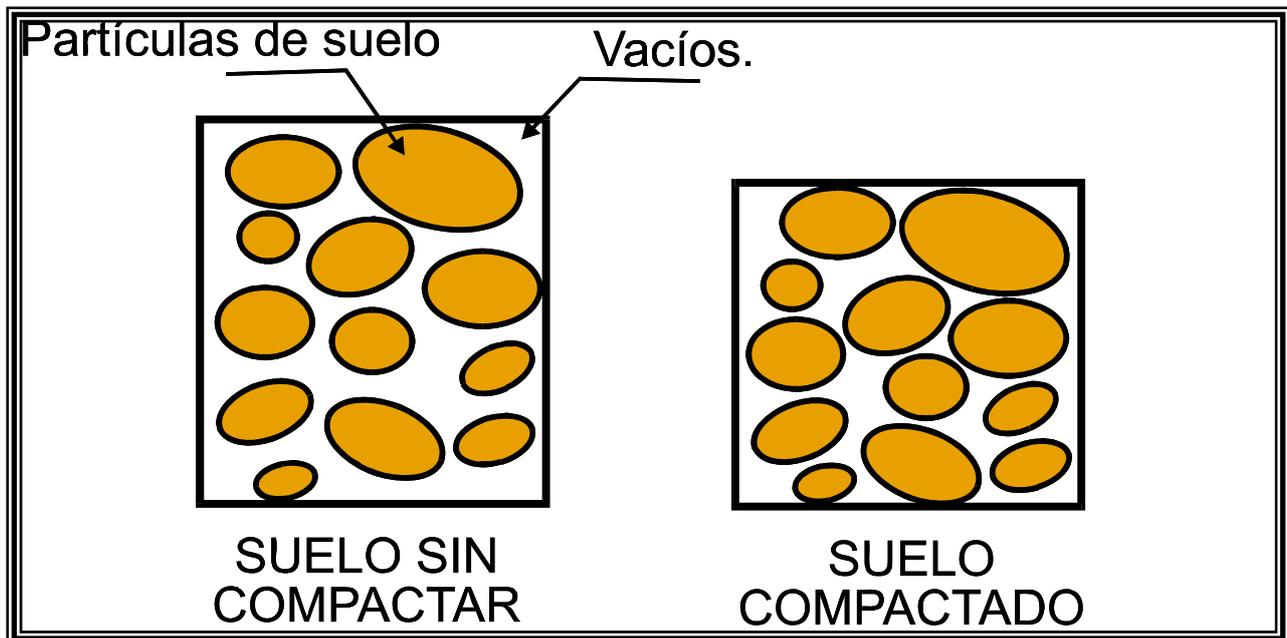
# I. COMPACTACIÓN

## I.1. DEFINICIÓN

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

Consolidación, se usa para la reducción de vacíos, relativamente lenta, debida a la aplicación de una carga estática, usualmente acompañada de expulsión de agua al 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.



**Figura 1. Se reduce el espacio entre las partículas, pero el tamaño de éstas no cambia sensiblemente.**

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

**Compactación:** Es el aumento artificial, por medios mecánicos, del peso volumétrico de un suelo, esto se logra a costa de 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 espacio entre las partículas de suelo.

## I.2. PROPÓSITO E IMPORTANCIA.

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.
- c) Impermeabilidad.

Entre las obras que requieren compactación se pueden señalar como más importantes las carreteras, las aeropistas y las presas de tierra.

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 impermeabilidad sean las supuestas por el diseñador, sin embargo, la obtención de la densidad de diseño no necesariamente asegura la resistencia mecánica supuesta, ya que ésta 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.

Se hace notar que compactar a mayores grados del especificado no es conveniente, es decir, compactar más, puede resultar perjudicial pues pueden fracturarse las partículas. Por otra parte es antieconómico.

La falla de algunas obras han obligado a que las especificaciones de compactación y sus controles sean cada vez más estrictos; las tolerancias en más o menos, del grado de compactación especificado, son generalmente fijadas desde el inicio de la obra.

### **I.3. PRUEBAS DE COMPACTACIÓN.**

En la construcción de terraplenes, sería ideal poder medir la resistencia del suelo para determinar cuando se ha alcanzado la resistencia adecuada.

Aunque se han hecho muchos intentos de medir la resistencia del suelo de forma fácil, el equipo actualmente disponible es voluminoso, caro y no aplicable a todos los suelos.

Entonces se decidió medir el peso volumétrico de los materiales compactados, pues R. R. Proctor, en 1933, encontró una correlación entre éste y la resistencia del material. Éste es el patrón de referencia con el que se miden los resultados.

Las pruebas que se realizan son:

#### **A) PRUEBA PROCTOR.**

Esta prueba se realiza con el llamado "Cilindro Proctor", que consiste en un cilindro de 4" x 6", como se muestra en la figura 2. Se toma el material a probar con una humedad conocida, y el cilindro se llena en tres capas sucesivas de aproximadamente la misma altura.

En cada capa se deja caer 25 veces un martillo de 2.5 kg, que tiene un diámetro de 2", repartiendo uniformemente estos golpes en la superficie expuesta del material. Después se quita la extensión del cilindro, se enrasa para tener un volumen conocido (el volumen del cilindro) y se obtiene el peso volumétrico seco del material. Una vez terminada esta primera prueba se tiene un par de valores (humedad-peso volumétrico) que se lleva a una gráfica (Figura 3).

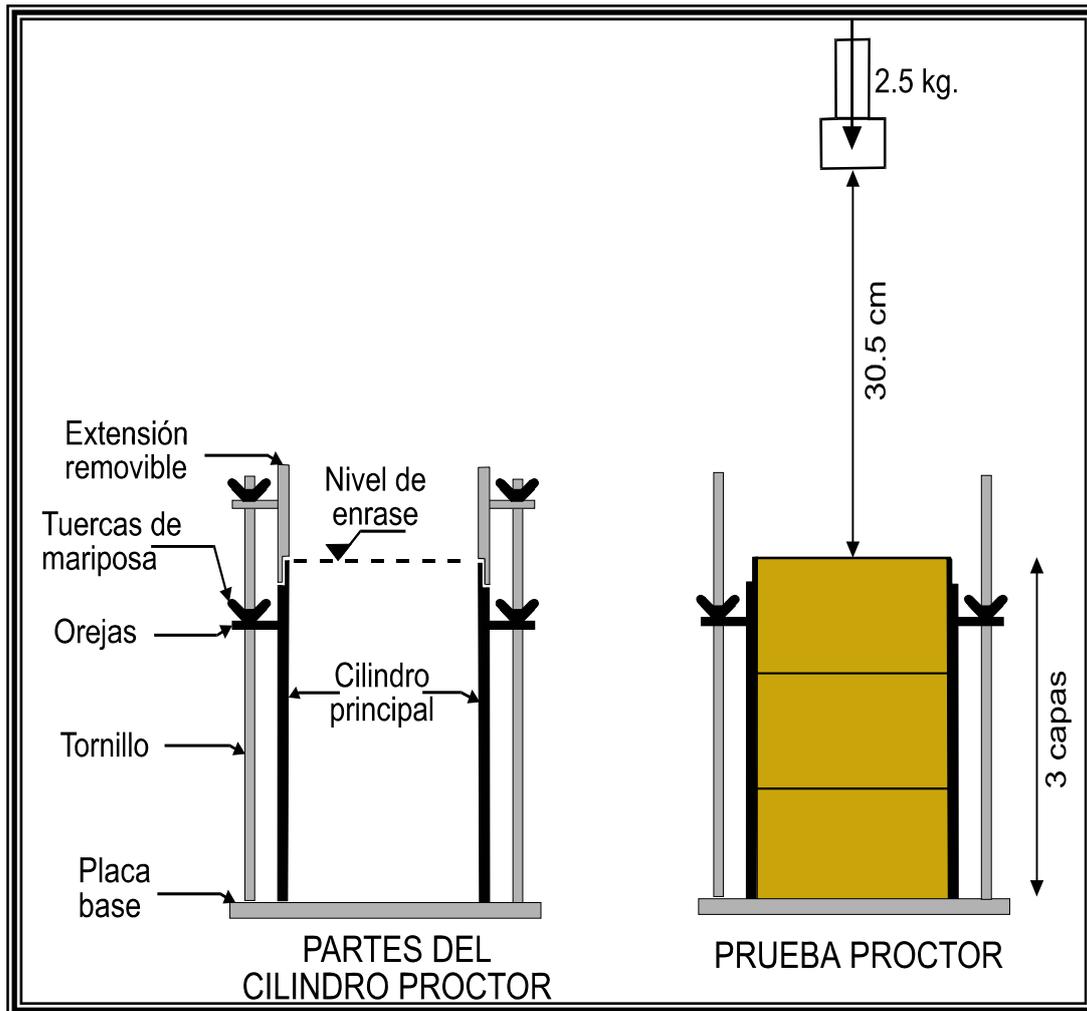


Figura 2.

Se repite la prueba aumentando un poco la humedad, entonces la humedad funciona como lubricante entre las partículas con lo que aumenta el peso volumétrico al aumentar la humedad. Así se van obteniendo otros pares de valores Humedad-Peso volumétrico. La prueba se repite hasta que el agua empieza a tomar el lugar de las partículas y el peso volumétrico comienza a bajar.

Es evidente que la curva que une los pares de valores obtenidos tiene un máximo peso volumétrico llamado “Peso Volumétrico Seco Máximo Proctor” (PVSMP). Obsérvese (Figura 3) que este máximo se ha obtenido aplicando sobre el material la misma energía específica de compactación en cada caso y sólo hemos variado la humedad. Esta humedad, por tanto, es la que hace más eficiente la compactación, y recibe el nombre de “Humedad Óptima”.

Es claro que en el campo debemos compactar el material con esta humedad óptima.

Las especificaciones hablan de cumplir un porcentaje del PVSMP que generalmente es del 90% ó del 95%, por lo tanto los resultados de la prueba de compactación de campo no se dan en peso volumétrico de la capa compactada sino en porcentaje de compactación.

Nótese que con el mismo esfuerzo de compactación no sería posible alcanzar el PVSMP si la humedad es inferior o superior al 12%. Entonces se requeriría un mayor esfuerzo de compactación, lo que es antieconómico.

Si el proyecto marcara 95% entonces el peso volumétrico mínimo a alcanzar en el campo sería:

$$1,810 \times 0.95 = 1,720 \text{ kg/m}^3$$

Este es nuestro “**metro**” para medir el grado de compactación.

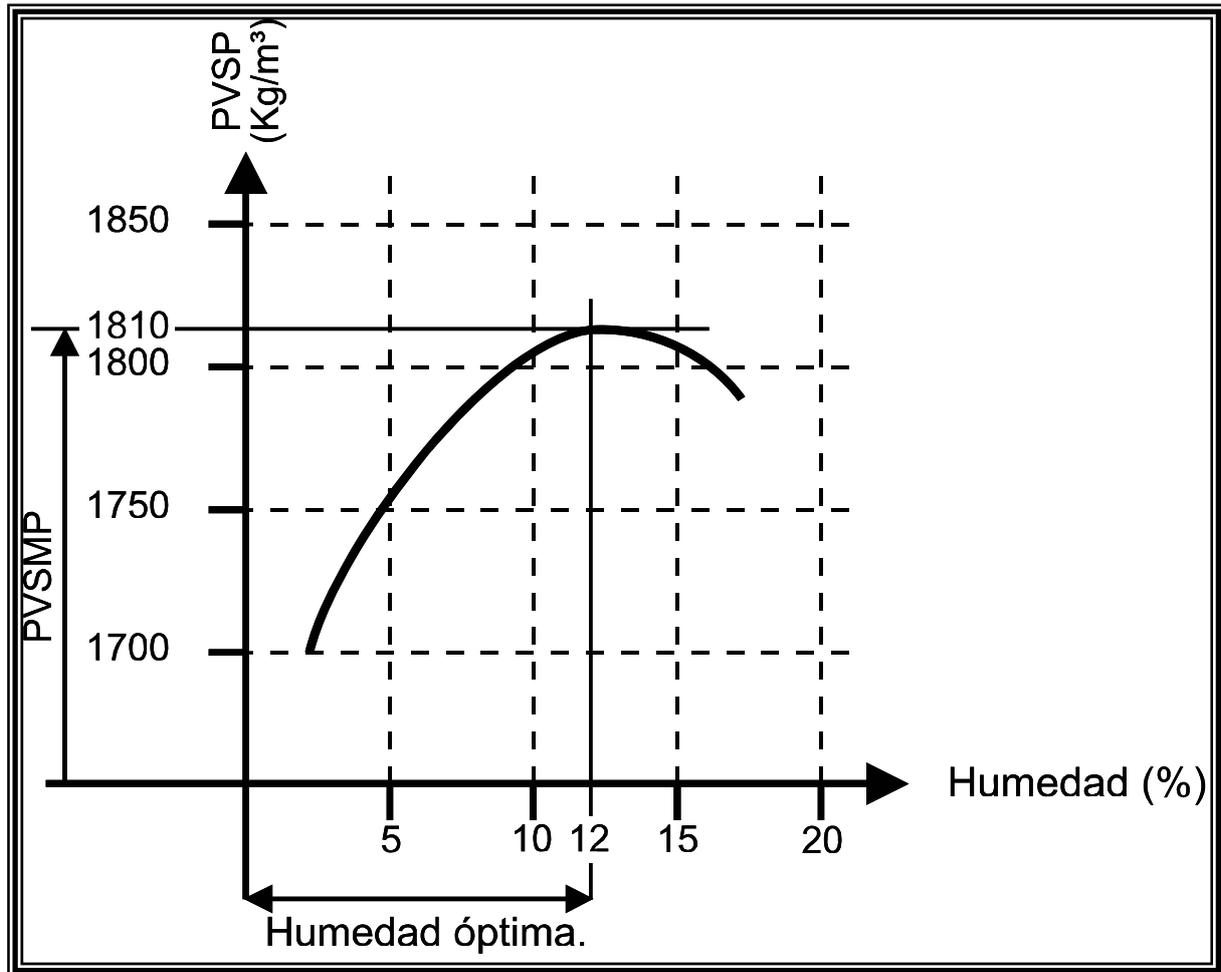


Figura 3.

## B) PRUEBA PROCTOR MODIFICADA.

Cuando los tránsitos se hicieron más intensos y los vehículos más pesados, se requirieron mayores resistencias y, por lo tanto, mayores pesos volumétricos, así se inventó la Prueba Proctor Modificada.

Esta prueba usa el mismo molde Proctor ya descrito pero se hace en cinco capas en lugar de tres y el martillo sube de 2.5 a 4.5 kg y se deja caer de 45.8 cm, en vez de 30.5 cm. (Figura 4).

Si realizamos ambas pruebas en el mismo material (Figura 5) observaremos que las resistencias son mayores en la Prueba Proctor Modificada debido a la mayor energía específica que se le aplica (La energía es 4.5 veces mayor) pero la Humedad Óptima es menor, esto debido a que el agua empieza antes a ocupar el lugar de las partículas de suelo.

Es importante hacer notar que esta prueba, tal como la hemos descrito tiene pequeñas variaciones según las diferentes especificaciones.

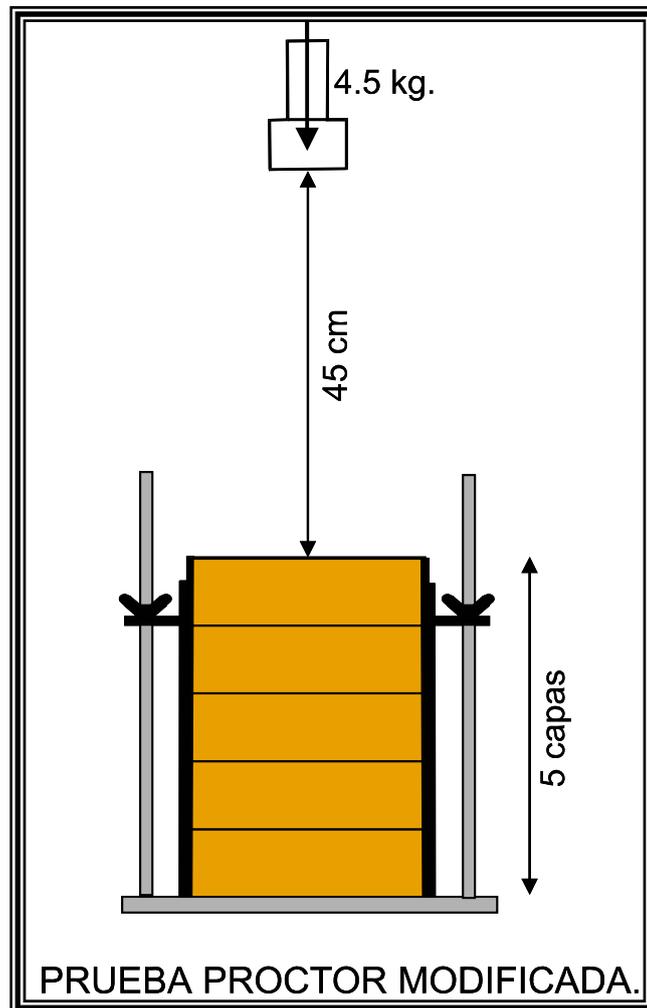
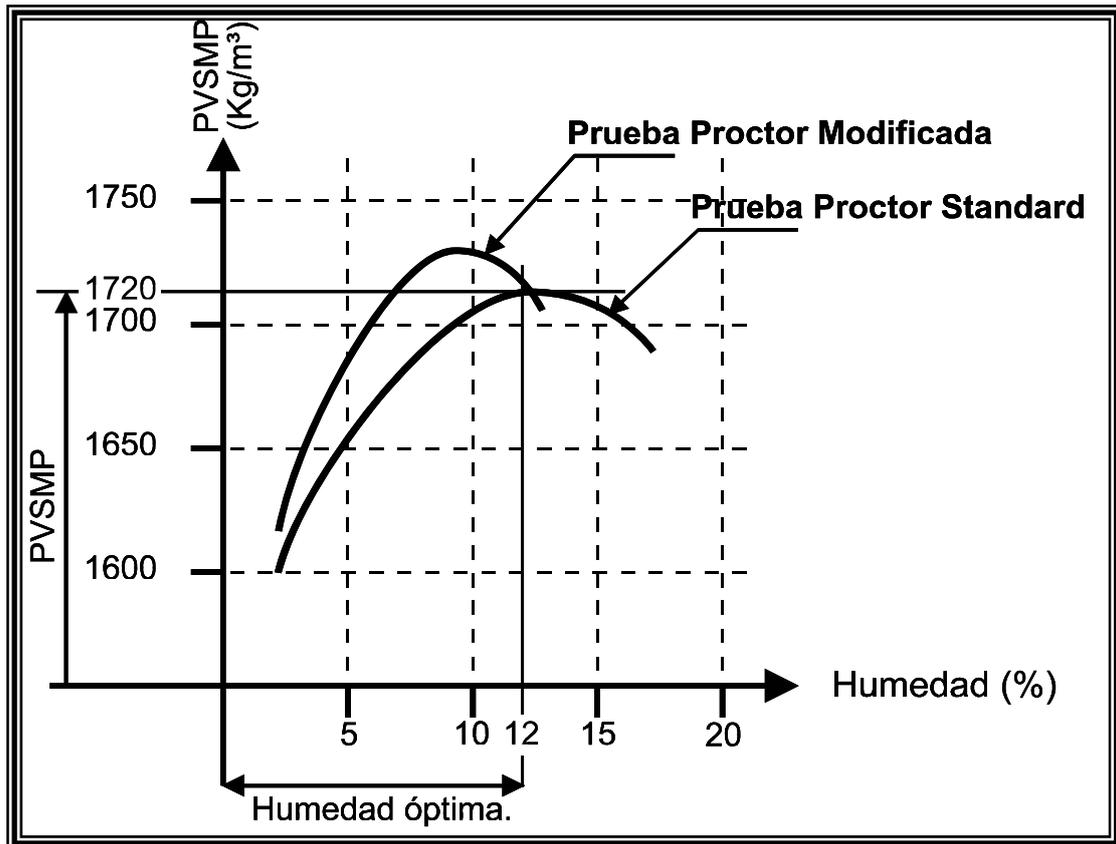


Figura 4.



**Figura 5. Comparación entre la Prueba Proctor Standard y la Prueba Proctor Modificada**

### C) PRUEBA PORTER.

Tanto la prueba Proctor Standard como la Prueba Proctor Modificada han dado muy buen resultado en suelos cuyos tamaños máximos son de 10 mm (3/8"), en suelos con partículas mayores al golpe del martillo no resulta uniforme y por lo tanto la prueba puede variar de resultados en un mismo material.

Para evitar esta dificultad se ideó la prueba Porter, que consiste en lo siguiente:

- a) Se toma una muestra del material a probar y se seca.
- b) Se pasa por la malla de 25 mm (1") y se determina el porcentaje, en peso, retenido en la malla, si el porcentaje es menor del 15%, se usará para la prueba el material que pasó la malla. Si el porcentaje retenido es mayor del 15% se prepara, del material original, una muestra que pase la malla de 1" y que sea retenida en la malla No. 4, de esta muestra se pesa un tanto igual al peso retenido, el que se agrega al material que paso la malla de 1", con este nuevo material se procede a la prueba.
- c) A 4 kg de la muestra así preparada se le incorpora una cantidad de agua conocida; y se homogeniza con el material.
- d) Con este material se llena, en tres capas, un molde metálico de 6" de diámetro por 8" de altura con el fondo perforado. Cada capa se pica 25 veces con una varilla de 5/8" (1.9 cm) de diámetro por 30 cm de longitud con punta de bala.
- e) Sobre la última capa se coloca una placa circular ligeramente menor que el diámetro interior del cilindro, y se mete el molde en una prensa de 30 Ton.
- f) Se aplica la carga gradualmente en la prensa Porter de tal manera que en cinco minutos se alcance una presión de 140.6 kg/cm<sup>2</sup>, 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 se humedece la base del molde, la humedad ensayada es inferior a la óptima.

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

#### I.4. MÉTODOS DE CONTROL.

Para medir en la obra el grado de compactación hay varios métodos:

- A) Medida física de peso volumétrico.
- B) Mediciones nucleares.
- C) Otros.

A) Medida física de peso volumétrico. Esta, con ligeras variaciones, se hace de la siguiente manera:

A.1) Medida física del peso del material.

A.1.1) Se excava un sondeo del espesor de la capa por probar (Figura 5A-1), el material se deposita en una charola metálica cuidando que todo el material del sondeo quede en la charola

A.1.2) Se pesa el material húmedo (PH = 2.192 kg en la figura 5A).

A.1.3) Se toma una muestra representativa del material, no menor de 100 gr, se pesa (P'H = 105 gr en la figura) se seca y se vuelve pesar (P'S = 100 gr en la figura).

A.1.4) Se calcula la relación (r) entre el peso húmedo (PH) y el peso seco (P'S) de la muestra:

$$r = \frac{P'H}{P'S} = \frac{105}{100} = 1.05 \text{ (a dimensional)}$$

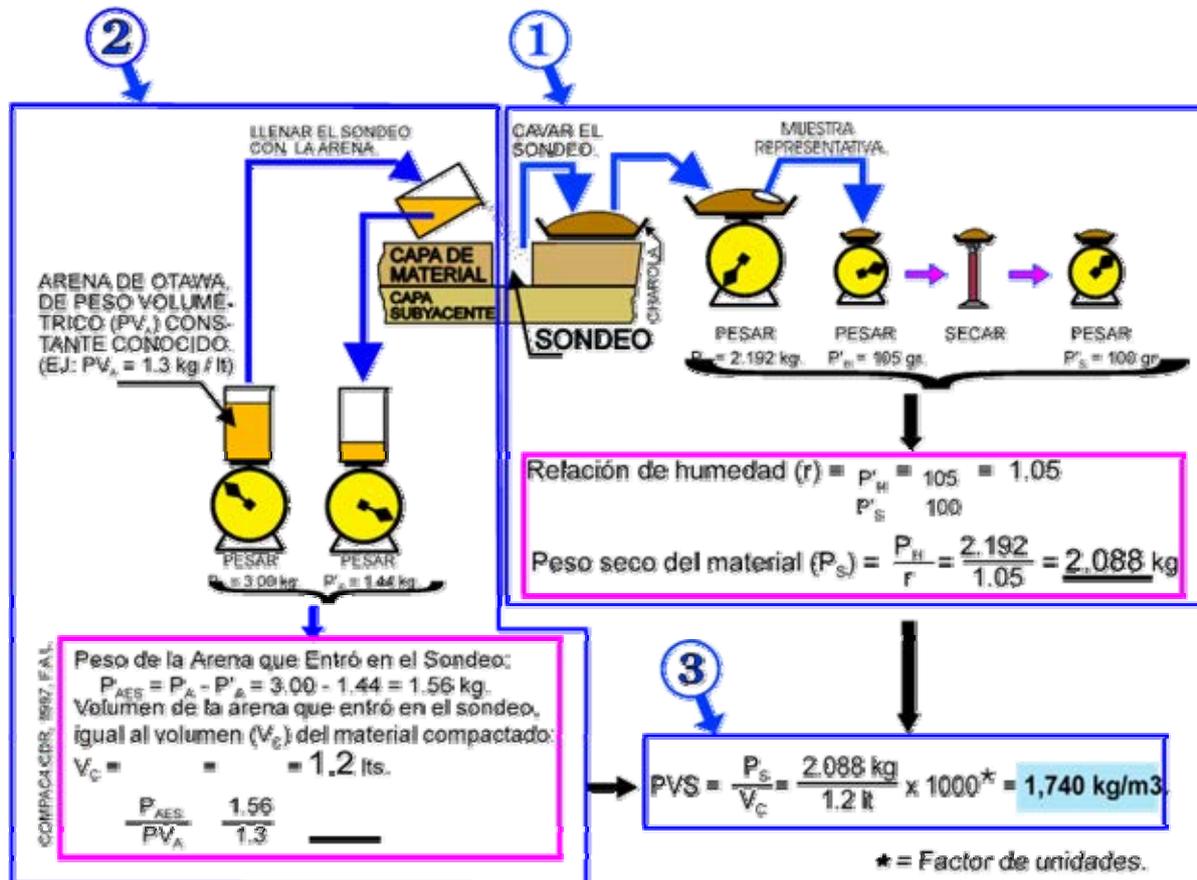


Figura 5A. Medición del peso volumétrico en campo.

A.1.5) Si la muestra es representativa esta relación de la muestra es la misma que para todo el material del sondeo, así puedo calcular el peso seco del material del sondeo (P'S), simplemente dividiendo el peso húmedo (PH) entre "r":

$$P'S = \frac{PH}{r} = \frac{2.192}{1.05} = 2.088 \text{ (a dimensional)}$$

A.2) Medida física del volumen:

Se hace con arena de Ottawa de peso volumétrico constante conocido (PVA = 1.3 kg /lt en nuestro ejemplo), no con probetas graduadas o algo semejante.

Esta arena es de peso volumétrico constante porque sus partículas son redondeadas y de tamaño uniforme. Se usa arena 30-40, que significa que pasa de la malla 30 y es retenida en la malla 40 también se usa arena 20-30 y 20-40 aunque, como el tamaño de las partículas no es tan uniforme, por la mayor diferencia de la abertura de las mallas, el peso volumétrico puede no ser tan constante, pero son mas baratas.

A.2.1) Con esta arena de Ottawa (Figura 5A-2) se pesa un recipiente que la contiene (PA = 3.00 kg) se llena el sondeo vaciando con cuidado la arena directamente del recipiente. Es conveniente vaciar la arena de la misma manera como se midió su peso volumétrico para evitar pequeñas alteraciones de éste.

Una manera de lograrlo, por ejemplo, es con un recipiente con patas con una válvula en el fondo. Como se muestra en la figura 5B, este recipiente se puede usar para:

- a) Para medirle peso volumétrico de la arena (a) utilizando un vaso graduado.
- b) Para medir el volumen del sondeo (b).

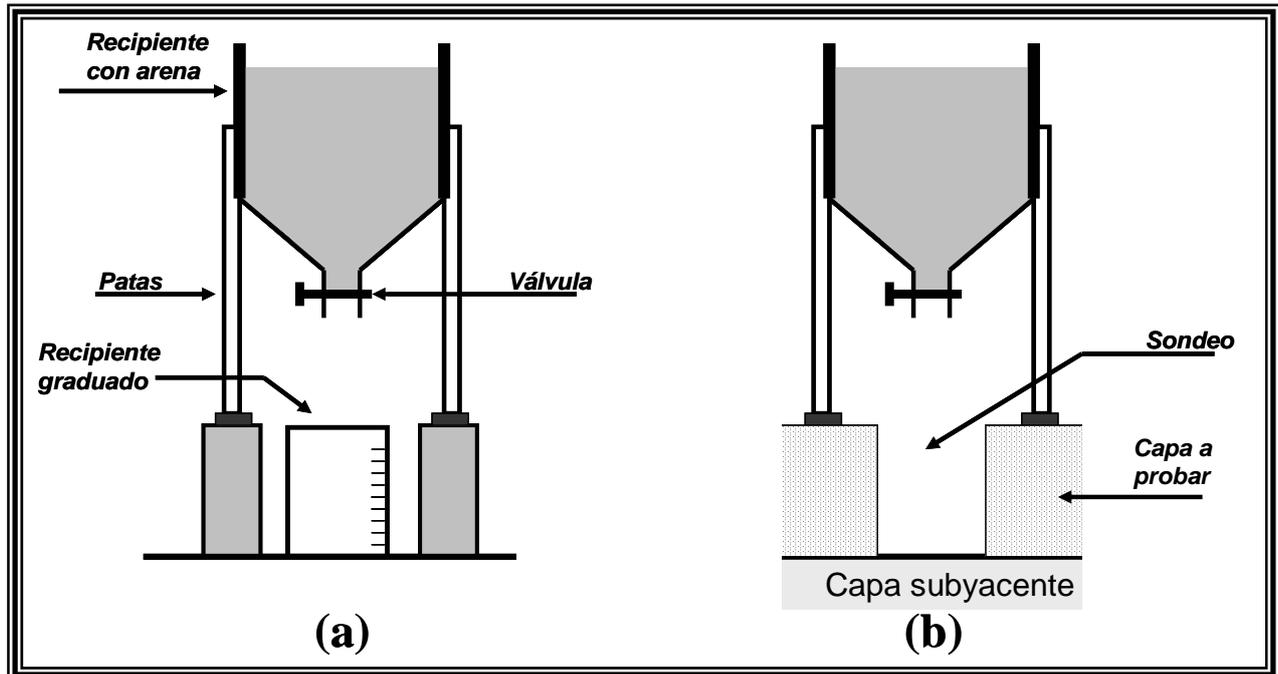


Figura 5B.

En ambos casos la arena cae con la misma velocidad y desde la misma altura, lo que asegura la uniformidad del peso volumétrico de la arena.

A.2.2) A continuación se vuelve a pesar el recipiente ( $P'A = 1.44$  kg). es evidente que el peso de la arena que entró en el sondeo (PAES) es la diferencia de PA y  $P'A$ :

$$PAES = PA - P'A = 3.00 - 1.44 = 1.56 \text{ kg}$$

Si dividimos este peso entre el peso volumétrico de la arena tendremos el volumen de la arena que entró en el sondeo, que es el volumen del sondeo y es también el volumen ( $V_c$ ) del material que extrajimos del sondeo cuando estaba compactado:

$$V_c = \frac{VAES}{PVA} = \frac{1.56}{1.3} = 1.2 \text{ lt} = 0.0012 \text{ m}^3$$

A.3) Cálculo del peso volumétrico del material de la capa.

A.3.1) Tenemos, entonces (Figura 5A-3), el peso seco ( $PS = 2.088 \text{ kg}$ ) y el volumen ( $V_c = 0.0012 \text{ m}^3$ ) del material compactado dentro del sondeo, por lo que su peso volumétrico seco (PVS) será:

$$PVS = \frac{PS}{V_c} = \frac{2.088}{0.0012} = 1,740 \text{ kg / m}^3$$

Y, si el sondeo es representativo de la zona de influencia de la capa compactada, será el peso volumétrico de la capa.

A.3.2) Ahora bien, las especificaciones, por lo general, no marcan pesos volumétricos sino porcentajes de compactación, por lo tanto, y suponiendo que este material es el mismo de la Prueba Proctor Standard mostrada en la figura 3 ( $PVSMP = 1,810 \text{ kg/m}^3$ ), calcularemos el porcentaje de compactación:

$$\% \text{ COMPACTACIÓN} = \frac{PVS}{PVSMP} = \frac{1,740}{1,810} = 0.96 = 96 \%$$

Por lo que se aprueba la compactación ya que el porcentaje de compactación es mayor al 95% especificado.

A.4) Capas de gran espesor:

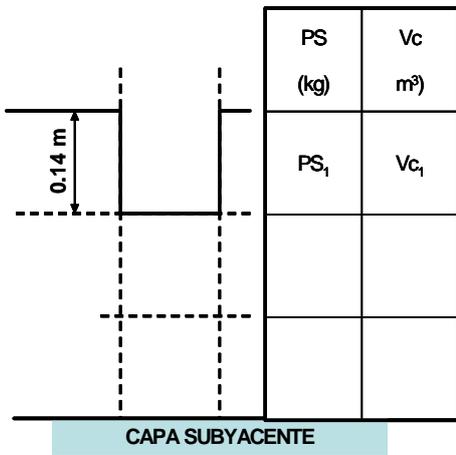
Con algunos equipos de compactación los espesores de la capa pueden llegar hasta 50 cm, por lo que en un sondeo de 10 ó 15 cm y de todo el espesor no es practicable. Para ello se divide la capa. Por ejemplo: Tengo 45 cm de espesor (Figura 5C) y realizo un primer sondeo de 15 X 15 y una profundidad de aproximadamente la tercera parte del espesor de la capa (Figura 5C-a) y procedo a determinar el peso seco (PS1) y el volumen (Vc1) del primer sondeo.

A continuación excavo un espacio a la altura del fondo del primer sondeo para tener espacio para un segundo sondeo bajo el primero (Figura 5C-b) y determino los valores del peso seco (PS2) y el volumen (Vc2) de este segundo sondeo.

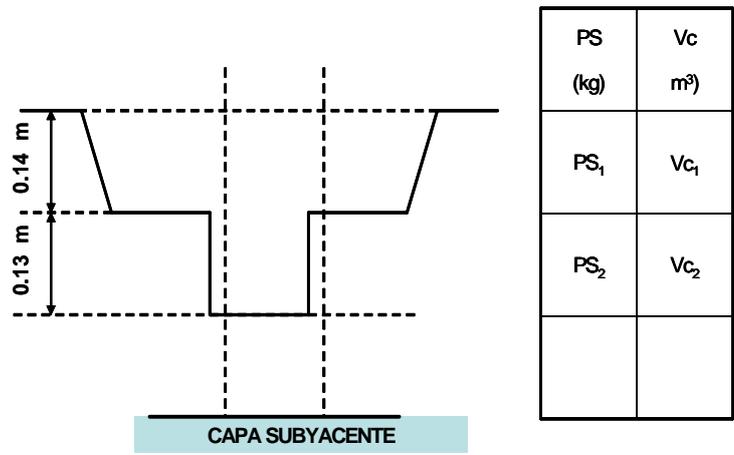
Procedo a la misma operación para el tercer sondeo, bajo el segundo y determino los valores del peso seco (PS3) y el volumen (Vc3) de este tercer sondeo (Figura 5C-c).

Sumo los tres pesos secos ( $\Sigma PS$ ) y los tres volúmenes ( $\Sigma Vc$ ), el peso volumétrico de la capa es la relación de los dos:

$$PVS = \frac{\Sigma PS}{\Sigma Vc}$$



(a)



(b)

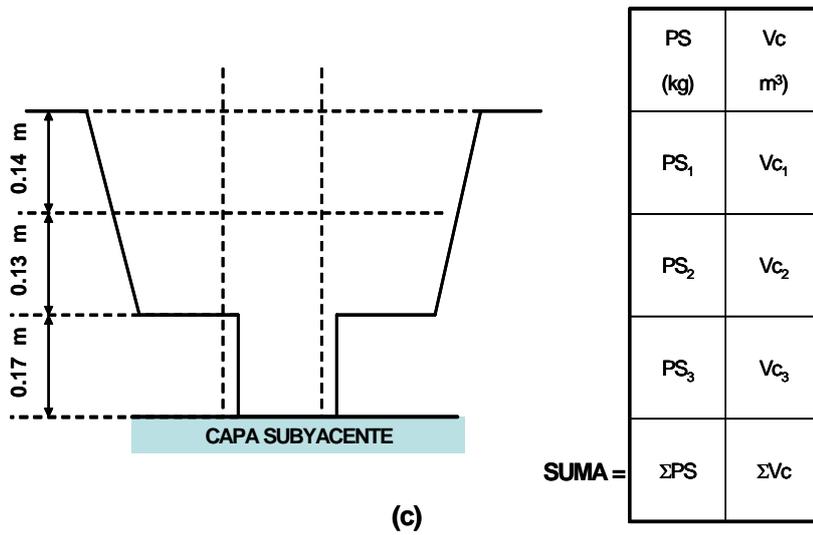


Figura 5C.

A.5) Muchas especificaciones, para asegurar una zona de influencia de cada sondeo limitan la separación entre ellos y su posición. Por ejemplo, para una carretera la especificación considera que la distribución de sondeos, que se muestra en la figura 5D a cada 20 m, alternando el ala izquierda, el centro, y el ala derecha, es suficiente para que sean representativos de toda la capa.

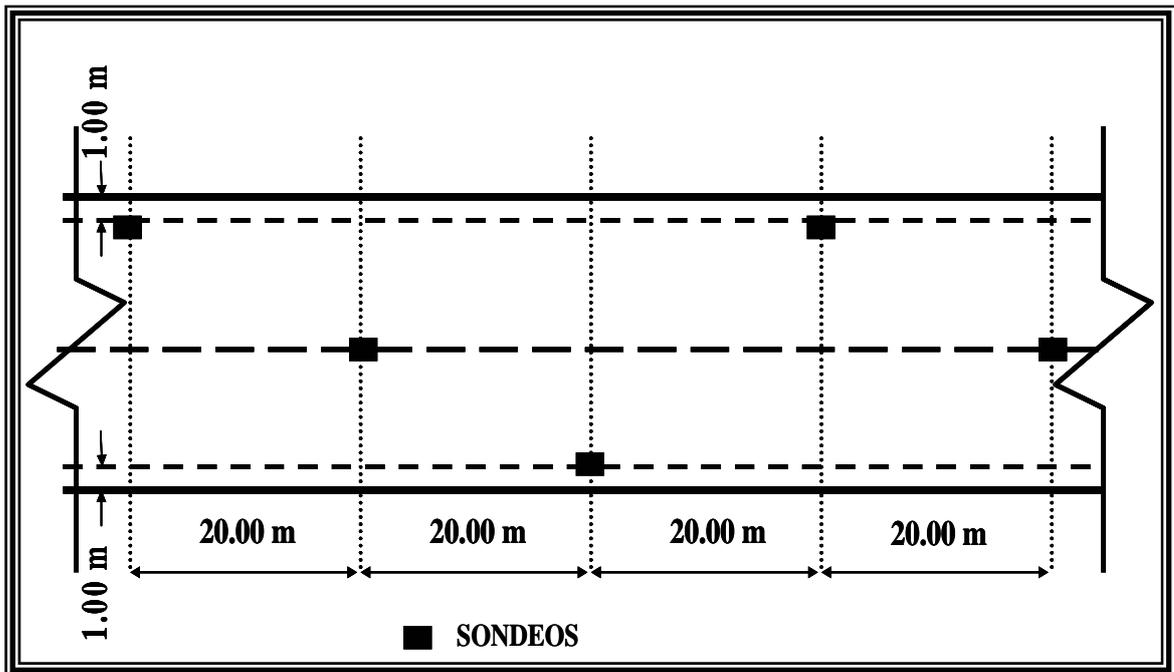
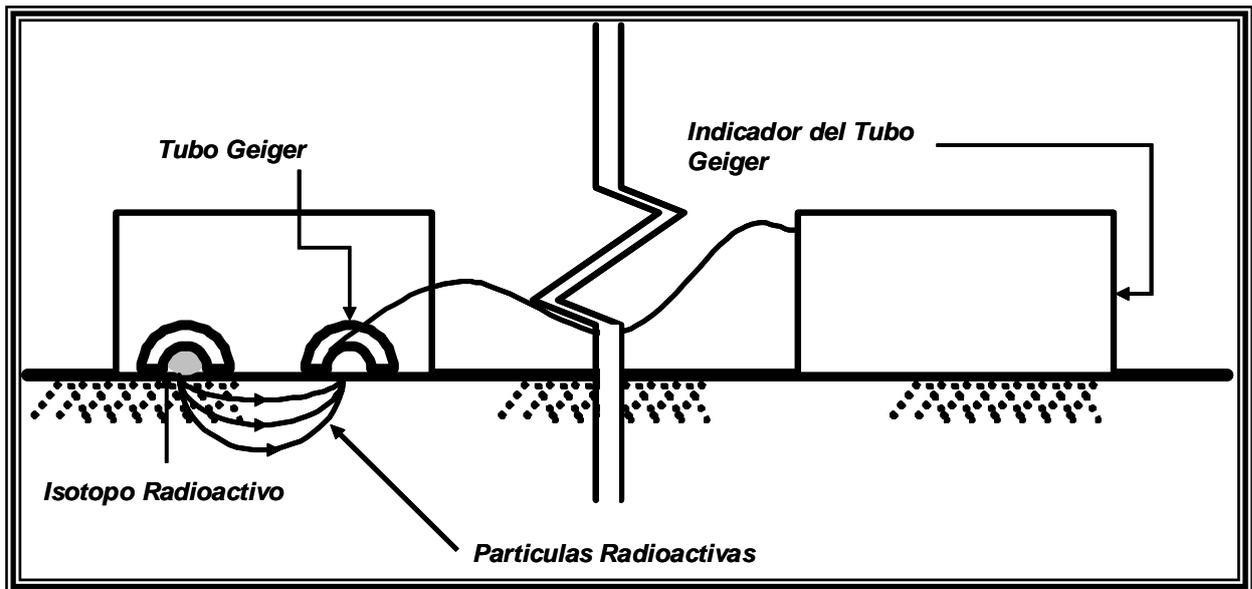


Figura 5D.

B) Prueba de medición nuclear: Para evitar el tiempo y costo que significa la prueba anterior se han ideado varios métodos, uno de ellos es el método nuclear, que consta en un bloque de plomo que contiene un isótopo radioactivo y un tubo Geiger (Figura 6).



**Figura 6.**

El bloque de plomo se coloca sobre la capa a probar, el número de partículas que llegan al tubo Geiger esta en función de la masa del material que tiene que atravesar, es decir, es función del peso volumétrico, entonces la medida del indicador debe calibrarse con otra medida real hecha por el procedimiento descrito en I.4.A en la misma capa que se va a probar.

Estos aparatos necesitan frecuentemente calibración, no siempre hay una indicación clara cuando el aparato no funciona bien y su exactitud varía con el tipo y la humedad de suelo.

Estas desventajas, sin embargo son despreciadas 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.

C) Otros: Como el problema principal es la determinación de la humedad se han desarrollado algunos métodos entre los que destaca principalmente el denominado "speedy" (Figura 7), que consiste en colocar un peso conocido de suelo mezclado con carburo de calcio dentro de un recipiente hermético provisto de un manómetro. El carburo es higroscópico y 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 el porcentaje de humedad, y así poder calcular su peso volumétrico seco.

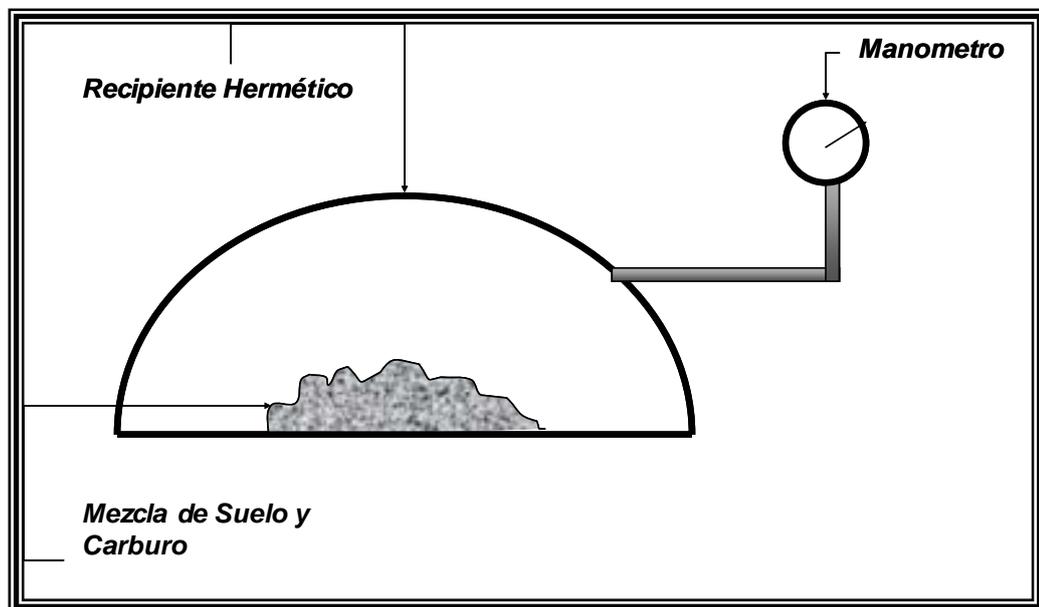


Figura 7.

## **II. TRABAJO DEL EQUIPO DE COMPACTACIÓN.**

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

### **II.1. ESFUERZOS CAUSADOS POR LOS EQUIPOS DE COMPACTACIÓN.**

**II.1.A) PRESIÓN ESTÁTICA:** La aplicación de una fuerza por unidad de área.

**II.1.B) IMPACTO:** Golpeo con una carga de corta duración, alta amplitud y baja frecuencia.

**II.1.C) VIBRACIÓN:** Golpeo con una carga de corta duración, alta frecuencia, baja amplitud.

**II.1.D) AMASAMIENTO:** Acción de amasado, reorientación de partículas próximas, causando una reducción de vacíos.

Antes de hablar de cada una de estas energías de compactación, recordemos que en los suelos a compactar varía el tamaño de sus partículas, desde los materiales con partículas muy pequeñas –limos y arcillas- donde la fuerza a vencer para ser compactadas es la cohesión. Por lo que estos materiales reciben el nombre de “cohesivos”; hasta los materiales formados con partículas mayores – gravas y arenas- cuya fuerza resistente es principalmente la fricción, por lo que reciben el nombre de “friccionantes”.

### **II.1.A. COMPACTACIÓN POR PRESIÓN ESTÁTICA.**

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, la parte superior de la capa alcanza primero mayores densidades que la inferior.

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.

Cuando estos equipos se lastran en exceso, pueden romper las partículas del material de la capa, por la sobrepresión, causando una variación en la granulometría del material, lo que, especialmente en los materiales granulares –arenas y gravas- no es deseable.

La presión es capaz de vencer la resistencia que presentan tanto la cohesión como la fricción, por lo que los equipos que producen esta energía son capaces de compactar toda clase de suelos.

### **II.1.B. COMPACTACIÓN POR IMPACTO.**

Esta energía consiste en la aplicación repetida de fuerzas de gran amplitud y baja frecuencia.

Como las fuerzas son grandes, este tipo de energía también es capaz de vencer tanto la cohesión como la fricción, y es capaz de compactar toda clase de suelos, pero como el acabado de la capa es demasiado irregular su uso se limita al cuerpo del terraplén, que generalmente está formado con materiales cohesivos, y por lo tanto se ha calificado como útil sólo para estos materiales.

### II.1.C. COMPACTACIÓN POR VIBRACIÓN.

La energía de vibración, contrario a la energía de impacto, consiste en la aplicación de fuerzas de baja amplitud y alta frecuencia.

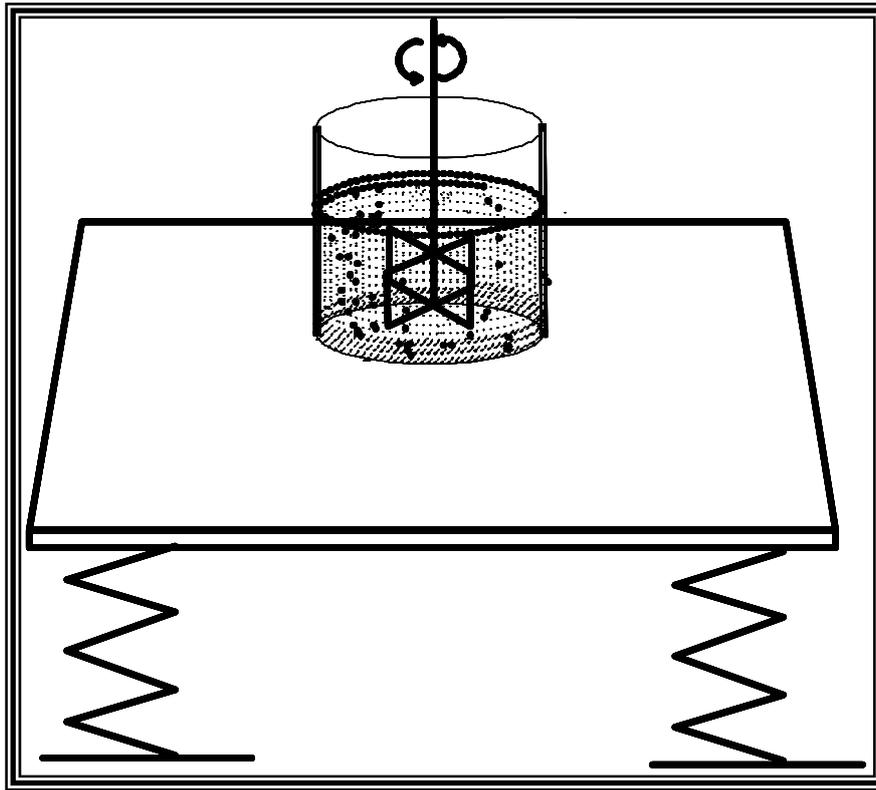
<b>ENERGÍA</b>	<b>AMPLITUD</b>	<b>FRECUENCIA</b>
IMPACTO	ALTA	BAJA
VIBRACIÓN	BAJA	ALTA

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

Como en la compactación por presión estática, en este tipo de compactación también se aplica una cierta presión, pero al mismo tiempo se somete al 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 (Figura 8).



**Figura 8.**

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

La experiencia sueca nos proporciona la siguiente tabla:

MATERIAL	CONTENIDO DE AGUA %	MOMENTO RESISTIVO (KG- CM)	
		EN REPOSO	CON VIBRACIONES
Grava	0	1700	40
Arena	10	600	45
Limo	12	150	25

Este tipo de energía evita los efectos de arco y disminuye la fricción interna del material permitiendo que las fuerzas compactivas trabajen a mayor profundidad. Por lo tanto esta energía es muy útil en materiales friccionantes.

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 porcentajes del grado de compactación que son difíciles, y a veces imposibles, de obtener con compactadores estáticos.
- b) Permite el uso de compactadores más pequeños.
- c) Se puede trabajar sobre capas de mayor espesor.
- d) Genera más altos rendimientos por el menor número de pasadas.
- e) Por las razones anteriores los costos de compactación resultan menores.

### **II.1.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 equipo “emerge” o “flota” cuando el material se encuentra compactado debidamente.

Esta energía es útil fundamentalmente en materiales cohesivos; en cambio su efectividad es casi nula en materiales granulares.

## II.2. COMPACTACIÓN CON AYUDA DE ENZIMAS.

Existen en el mercado unas enzimas que tienen la propiedad de compactar los suelos, especialmente los suelos cohesivos. En realidad son eficientes pero su costo todavía no es competitivo con los métodos tradicionales de compactación con equipos, por lo que su uso no se ha generalizado.

**Resumiendo:** En la gráfica 1 se muestran los tipos de suelo y las energías de compactación que son eficaces para cada uno de ellos.

MATERIAL DE LA CAPA DE COMPACTACIÓN \ ENERGÍA	MATERIALES COHESIVOS O FINOS (ARCILLAS Y LIMOS)	MATERIALES FRICCIONANTES O GRUESOS (GRAVAS Y ARENAS)
PRESIÓN	[Barra amarilla]	
AMASAMIENTO	[Barra amarilla]	
IMPACTO	[Barra amarilla]	
VIBRACIÓN		[Barra amarilla]

**Gráfica 1. Correlación entre los diferentes materiales a compactar y las energías de compactación más eficientes.**

### III. EQUIPO DE COMPACTACION.

#### INTRODUCCIÓN.

Antes de estudiar los equipos de compactación, y para entenderlos cabalmente, veremos como son los esfuerzos en un suelo bajo una carga, basándonos en las teorías de Boussinesq.

Si a una placa de área "A" sobre un suelo, se le aplica a una carga "P", se forma un bulbo de esfuerzos, como se muestra en la figura 9-a.

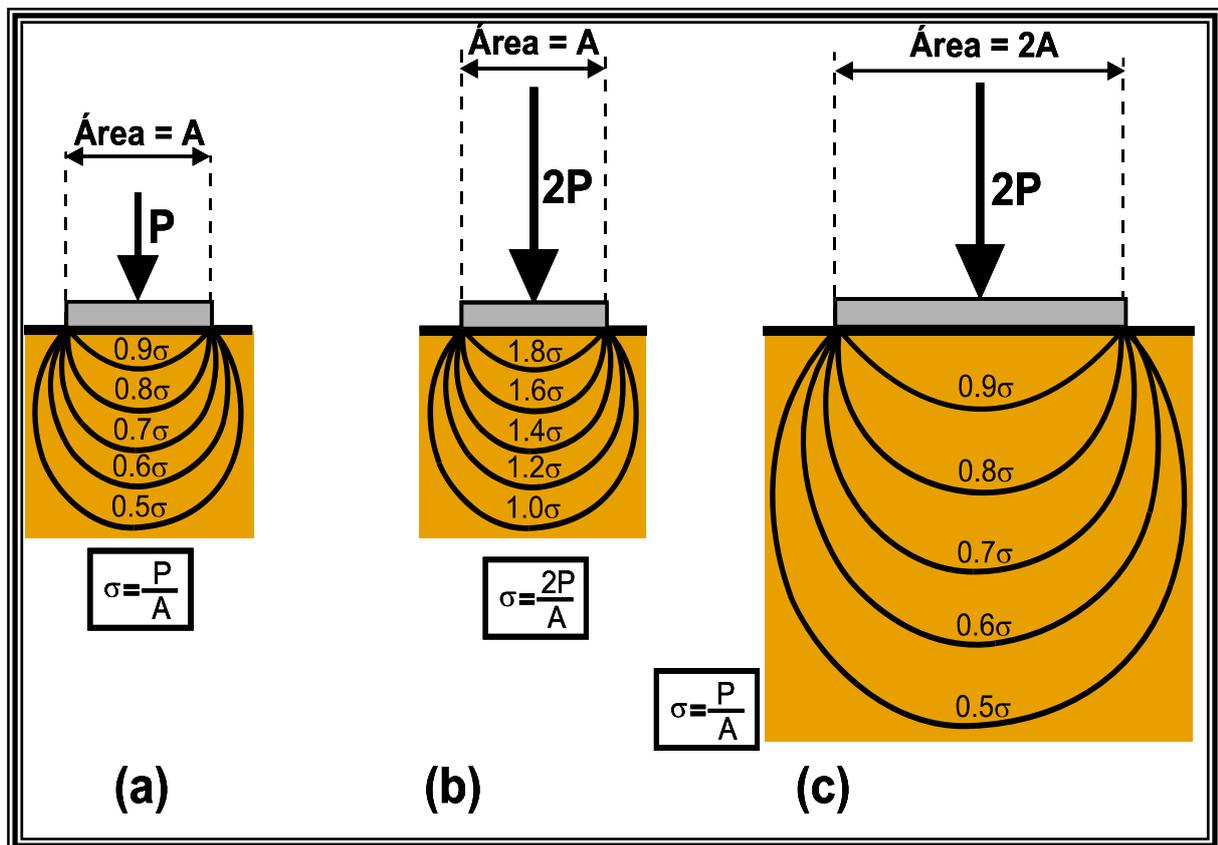


Figura 9. Esfuerzos en un suelo por la superposición de una carga estática.

Si se aumenta la carga al doble ( $2P$ ), sin variar el área (Figura 9-b), los esfuerzos aumentan al doble, lo que puede fracturar las partículas de suelo variando la granulometría, además no se incrementa la profundidad del bulbo. Por esta razón no es conveniente lastrar los equipos más allá de las especificaciones del fabricante pues también se pueden dañar al someterlos a cargas superiores a las de diseño.

Pero, si se aumenta la carga y el área al doble (Figura 9-c) el esfuerzo es el mismo que en (a) pero la profundidad del bulbo sí aumenta. Entonces, si se desean capas de mayor espesor deben usarse equipos más pesados y con áreas de contactos mayores.

- 1) De lo anterior se deduce que es necesario controlar el espesor de las capas para proporcionar suficiente energía al suelo y obtener la compactación deseada.
- 2) De (b) se deduce que no se puede aumentar significativamente el espesor de la capa simplemente lastrando excesivamente el equipo de compactación.
- 3) De (c) se deduce que para aumentar el espesor de la capa se debe cambiar el equipo por otro que tenga mayor superficie de contacto, procurando que la presión aumente también en la misma proporción.

Boussinesq desarrolló la teoría de los bulbos de presión para un medio elástico. Para fines prácticos de compactación podemos considerar elásticos a todos los suelos ya que esta teoría es razonablemente cierta aún para suelos granulares.

Hay una gran variedad de equipos de compactación, en diferentes marcas y modelos. Para este trabajo se han clasificado por la energía de compactación que generan de la siguiente manera:

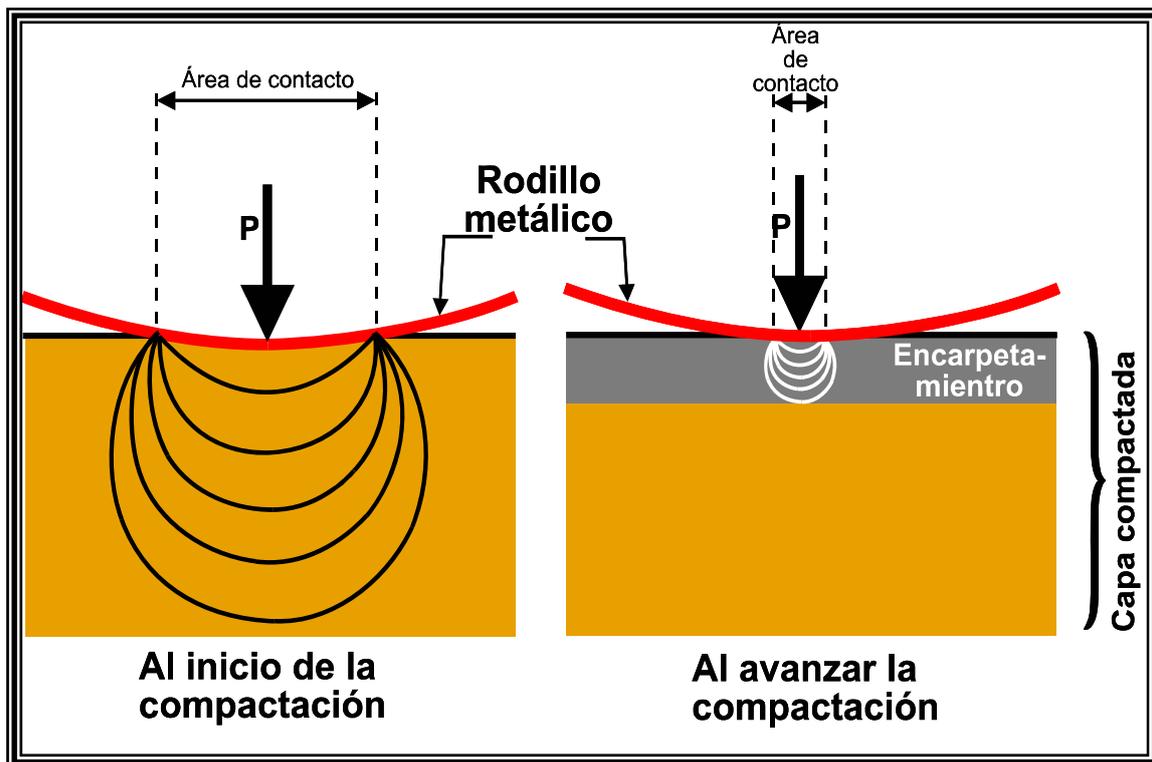
1. Rodillos metálicos.
2. Rodillos neumáticos.
3. Rodillos pata de cabra.
4. Rodillos de reja.
5. Rodillos de impacto.
6. Rodillos vibratorios.
7. Rodillos pata de cabra vibratoria.

### **III. 1. RODILLOS METÁLICOS.**

Estos equipos transmiten al suelo energía de presión y algo de amasamiento en materiales cohesivos.

Al principio de la compactación al material de la capa es poco resistente y el rodillo se hunde una cierta cantidad con un cierto ancho de contacto (Figura 10), pero conforme el proceso avanza el material aumenta su resistencia por lo que la penetración es menor. Esto tiene dos consecuencias importantes:

- 1) Aumenta la presión sobre la capa al reducirse el área de contacto, lo que, como se vio en la introducción, no es conveniente.
- 2) Se reduce la profundidad del bulbo de presión, por lo que la parte superior de la capa recibe una mayor energía de compactación y comienza a diferenciarse de la parte inferior.



**Figura 10. Bulbos bajo un rodillo metálico.**

Si a esto se agrega la costumbre de hacer un riego superficial adicional para compensar las pérdidas por evaporación –riego que sólo penetra muy poco porque la compactación disminuye la permeabilidad de la capa- la parte superior de la capa se diferencia aún más y se separa del resto de la capa. Esto se llama “encarpetamiento” o “calavereo” por que se manifiesta en pequeños baches llamados “calaveras”. El encarpetamiento es un defecto grave.

Por estas razones, y por tener rendimientos muy bajos, los rodillos metálicos han perdido mucho campo de acción en grandes movimientos de tierras. Su uso se ha limitado en construcción pesada para dar una primera pasada con objeto de preparar la capa para otros compactadores. Un ejemplo típico es el caso de los compactadores vibratorios que no pueden empezar a compactar cuando el material está suelto y requieren una primera compactación.

Pero ahora hay compactadores vibratorios que pueden trabajar estáticos, por lo que en estos trabajos los rodillos metálicos ya no se usan.

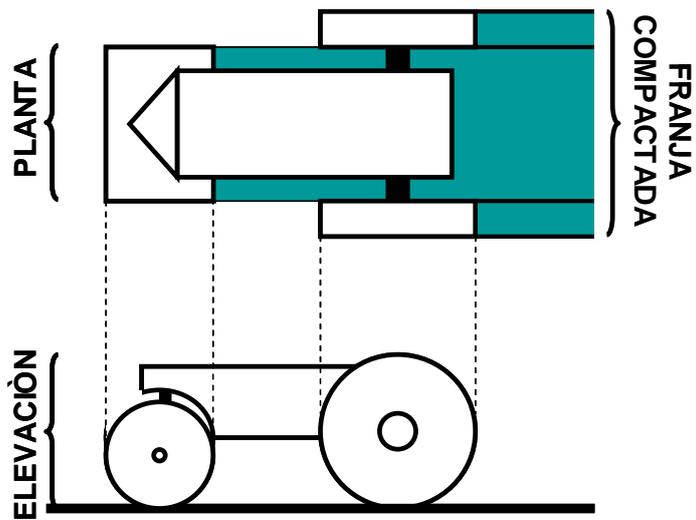
Sin embargo, como la energía que transmiten al suelo es Presión, son capaces de compactar toda clase de suelos, y muy útiles por su versatilidad cuando se realiza un trabajo pequeño –digamos unos 5 000 m<sup>2</sup> de pavimento- porque son capaces de recomprimir el terreno natural, compactar los terraplenes, la sub-base y la base.

Estos equipos se dividen en dos grandes grupos:

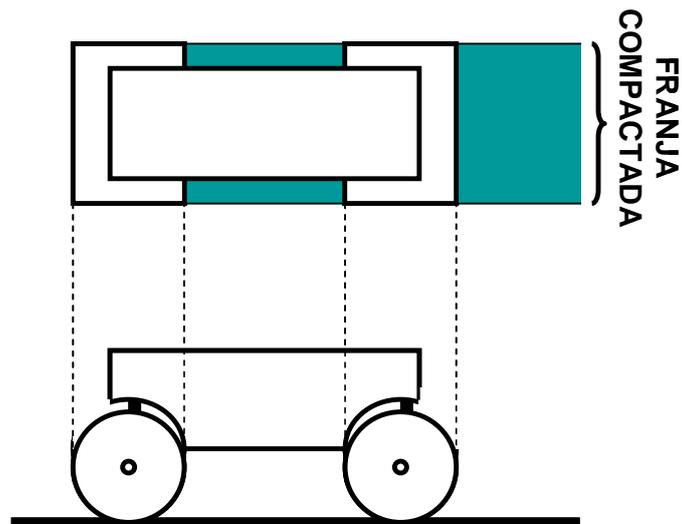
- 1) La “aplanadora” o “plancha” de tres ruedas que consiste en dos ruedas de tambor paralelas en la parte trasera y un rodillo delantero también de tambor. Los tambores huecos se pueden lastrar. Estas planchas se nombran: 10-12 toneladas, porque sin lastra se nombran: 6-8 toneladas, por que pesan 6 toneladas sin lastrar y 8 toneladas lastradas.
- 2) La plancha “Tandem”, que tiene dos rodillos de tambor paralelos, uno adelante y otro atrás. Por lo general se nombran: 6-8 toneladas, por que pesan 6 toneladas sin lastrar y 8 toneladas lastradas.

En la figura 10A se muestra la configuración de las planchas. Obsérvese como en la plancha 3R el rodillo delantero cubre la franja que van a dejar las ruedas traseras y en la plancha tandem los rodillos cubren la misma franja. Además el peso se reparte de tal manera que a cada rueda o rodillo le llegue una fuerza proporcional al área de contacto que cubre cada una. Esto es con objeto que a cada centímetro cuadrado de la capa le sea transmitida igual energía de compactación.

Estos equipos no se deben lastrar –aunque se hace con cierta frecuencia- porque lastrados aumentan el encarpamiento.



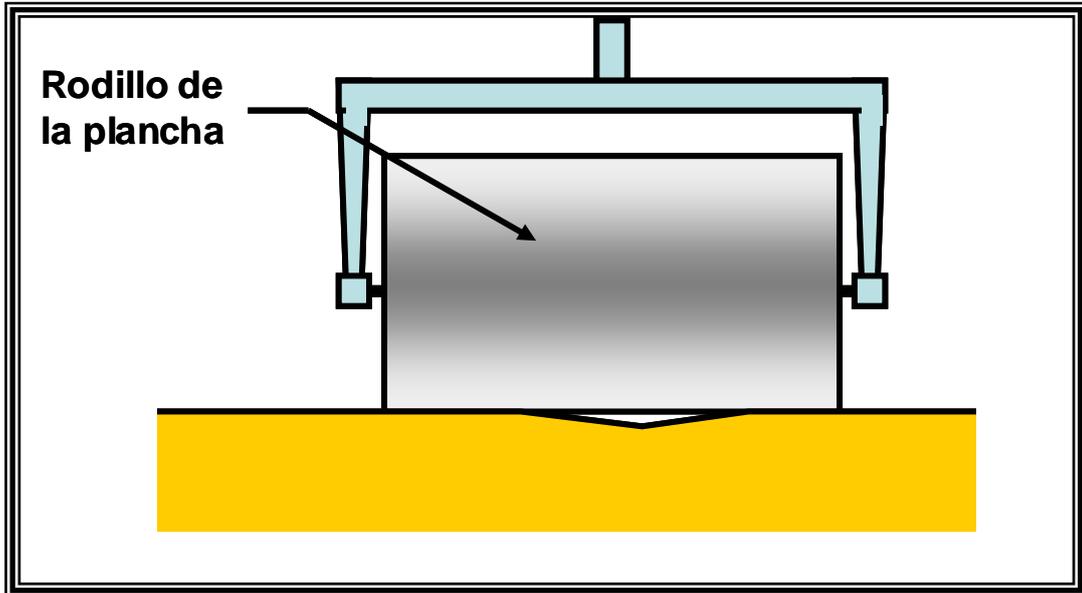
**PLANCHA 3 RUEDAS**  
**3R 10 – 12 TONS.**



**PLANCHA TANDEM**  
**6 – 8 TONS.**

**Figura 10A. Configuración de las planchas.**

La rigidez de los rodillos no permite que sean compactadas pequeñas áreas bajas o suaves (Figura 10B).



**Figura 10B. Pequeñas áreas bajas o suaves que “puentean” los rodillos de las planchas.**

Añadiremos las planchas en la gráfica 1, las colocaremos en energía de presión y capaces de compactar toda clase de suelos (Gráfica 2).

MATERIAL DE LA CAPA ENERGÍA DE COMPACTACIÓN	MATERIALES COHESIVOS O FINOS (ARCILLAS Y LIMOS)	MATERIALES FRICCIONANTES O GRUESOS (GRAVAS Y ARENAS)
PRESIÓN	PLANCHAS	
AMASAMIENTO		
IMPACTO		
VIBRACIÓN		

**Gráfica 2. Aplicación de las planchas.**

### III. 2. RODILLOS NEUMÁTICOS (SOBRE LLANTAS).

Los rodillos neumáticos son muy eficientes y a menudo esencial 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 de presión.

Estos compactadores pueden ser jalados o autopropulsados.

Se pueden dividir conforme al tamaño de sus llantas en:

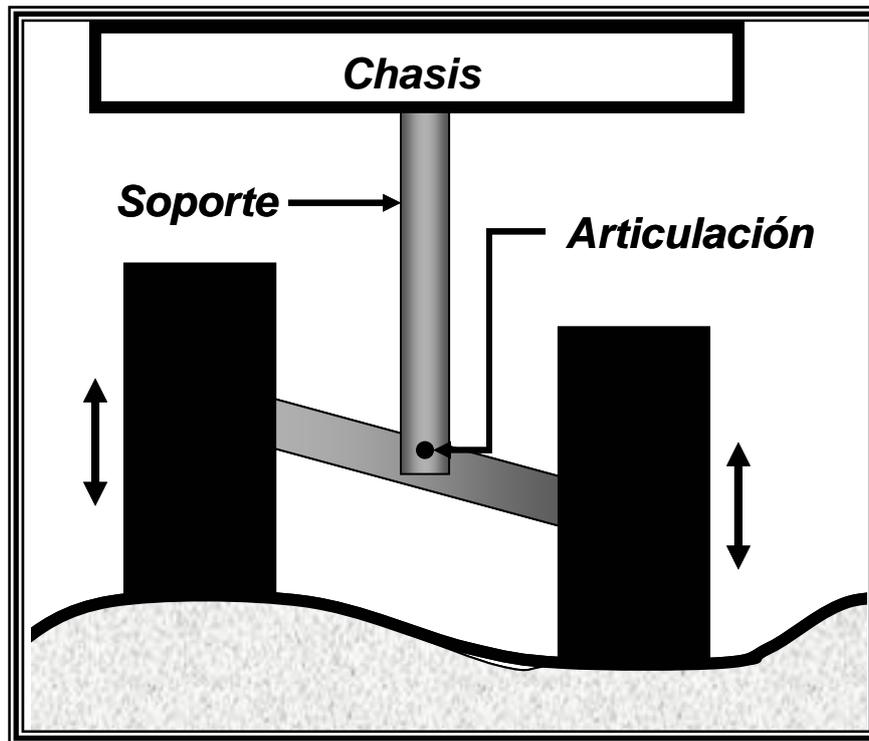
- A) De llantas pequeñas
- B) De llantas grandes



**Figura 11. Compactador de neumáticos de llantas pequeñas.**

**A) DE LLANTAS PEQUEÑAS.**

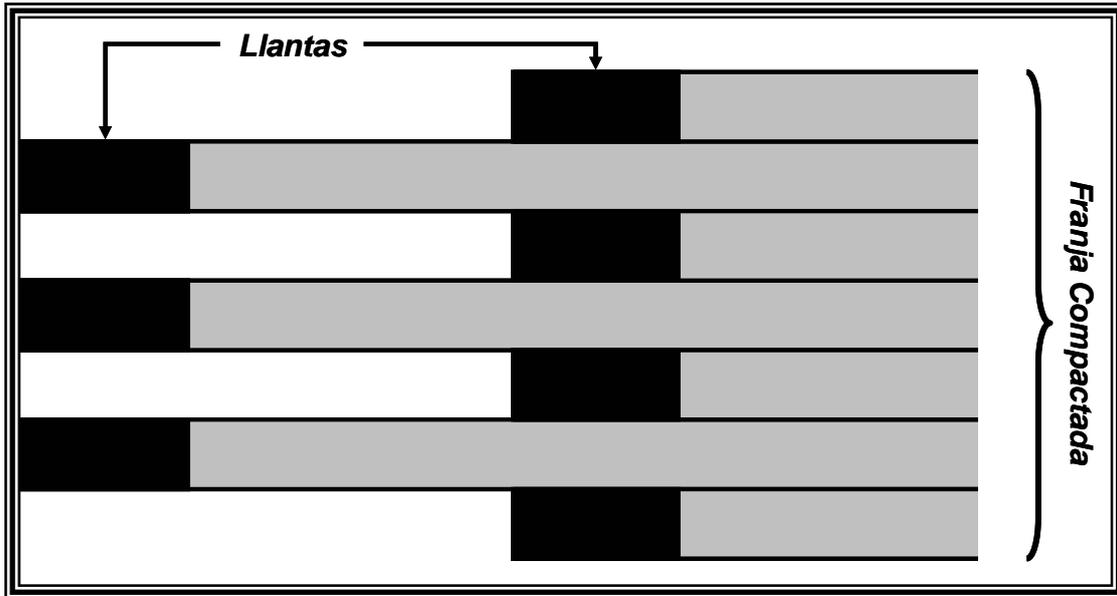
En estos compactadores las llantas pueden balancearse de dos en dos, lo que le permite compactar pequeñas áreas bajas o suaves (Figura 11A), lo que no pueden hacer los rodillos metálicos.



**Figura 11A. Balanceo de las llantas del compactador neumático.**

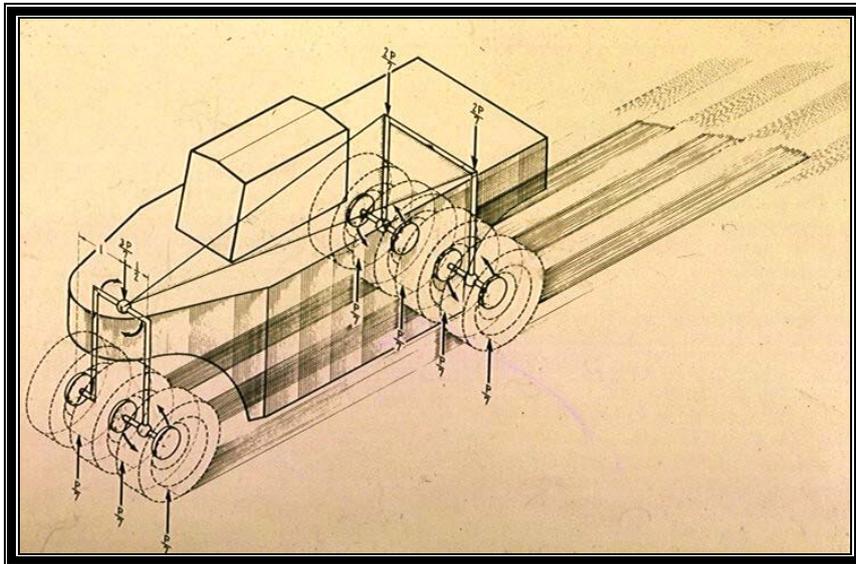
El efecto de traslape de las llantas delanteras con las traseras, se logra por que un eje tiene un número par de llantas y el otro un número impar, por lo que siempre el número de llantas del compactador es impar.

Las llantas son lisas, sin dibujo, para evitar dejar marcas en la superficie de la capa que se compacta, especialmente cuando se compactan carpetas asfálticas.



**Figura 11B. Traslape de las huellas de las llantas delanteras y traseras de un compactador neumático (Planta).**

Tienen dos ejes en tandem y el número total de llantas varía entre 7 y 13. la disposición de las llantas es tal que las llantas traseras traslapan con las delanteras (Figura 11B) y el peso total del compactador se reparte de tal manera que cada llanta soporta el mismo peso (Figura 12A). Estos arreglos permiten que cada centímetro cuadrado de la capa reciba la misma energía de compactación.



**Figura 12A.**

Estos compactadores proporcionan una presión de contacto semejante a la proporcionada por equipos de mayor peso, tienen buena maniobrabilidad, 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.

El peso total del compactador se reparte de tal manera que cada llanta soporta el mismo peso con objeto de que cada centímetro cuadrado de la capa reciba la misma energía de compactación.

**B) DE LLANTAS GRANDES.**- Son generalmente arrastrados por un tractor sobre neumáticos (Figura 12B) y pesan entre 15 y 20 toneladas. Tienen 4 ó 6 llantas en un mismo eje. Son, por su peso, difíciles de maniobrar y de transportar, por lo que su aplicación se debe limitar a aquellos trabajos de poca pendiente, de tramos rectos, largos y de fácil acceso, generalmente en aeropuertos. Por estas razones están siendo desplazados por otros equipos más ligeros y versátiles.



**Figura 12B.**

Los factores más importantes que intervienen en el trabajo de compactadores neumáticos son:

- a) **Peso Total.**- Dependiente del número total de llantas y del sistema de suspensión del compactador se puede conocer el peso o fuerza aplicada por llanta. A mayor peso total, mayor carga por llanta, en caso de tratarse de una suspensión isostática.
- b) La presión del inflado es importante, pero está ligada íntimamente a la carga de la llanta. Si “W” es el peso del compactador , y “p” es la presión de contacto (Figura 13):

Podemos observar que si aumentamos el peso sin aumentar la presión (Figura 14), aumentamos la profundidad del bulbo, pero no aumentamos la presión, éstos nos permitiría trabajar capas relativamente mayores, pero el aumento de eficiencia es casi nulo, y las llantas durarán menos pues estamos aumentando el trabajo de deformación de la llanta.

Si aumentamos la presión sin aumentar la carga (Figura 15) 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 bases, sub-bases y carpetas.

Si aumentamos el peso y la presión (Figura 16), 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 de las llantas y 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 algunos fabricantes de equipo progresistas han equipado sus máquinas con implementos para variar rápidamente la presión de inflado de sus equipos.

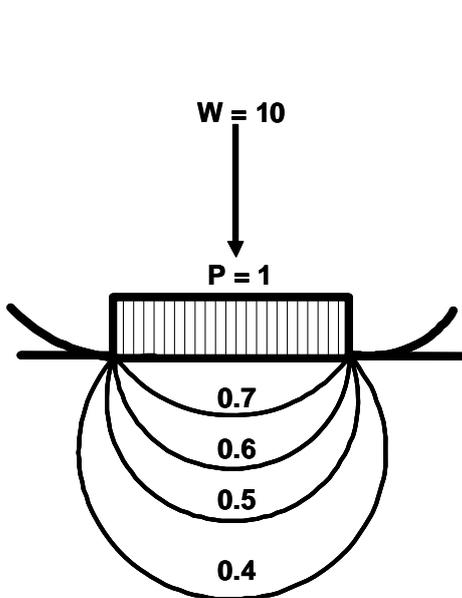


Figura 13.

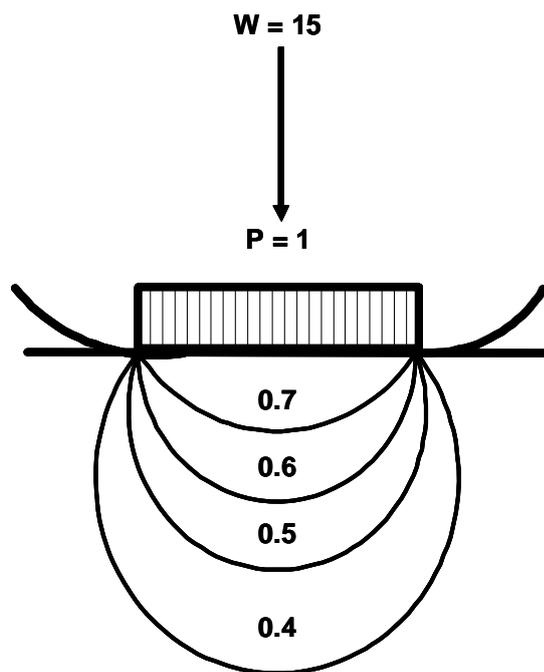


Figura 14.

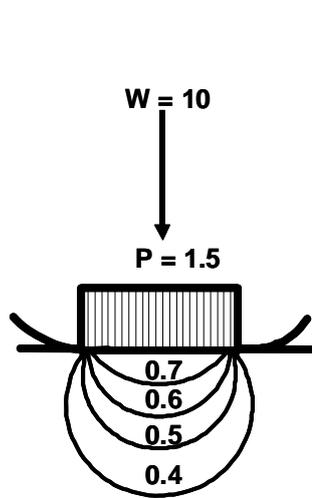


Figura 15.

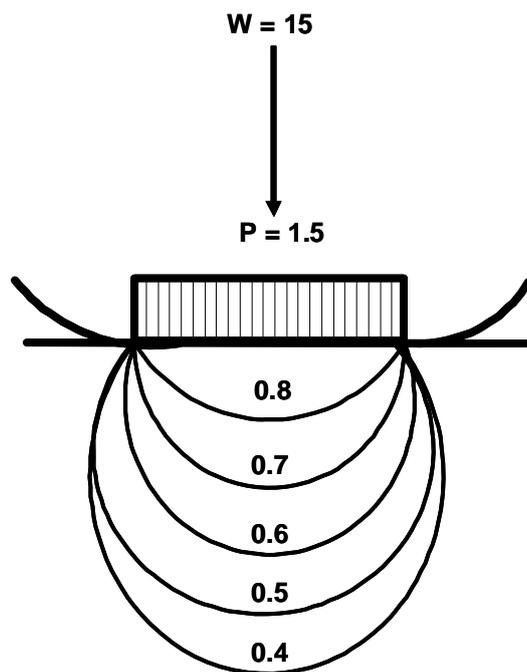


Figura 16.

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

Tiene 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.



**Figura 17. Combinación de rodillos metálicos y neumáticos (duo-pactor).**

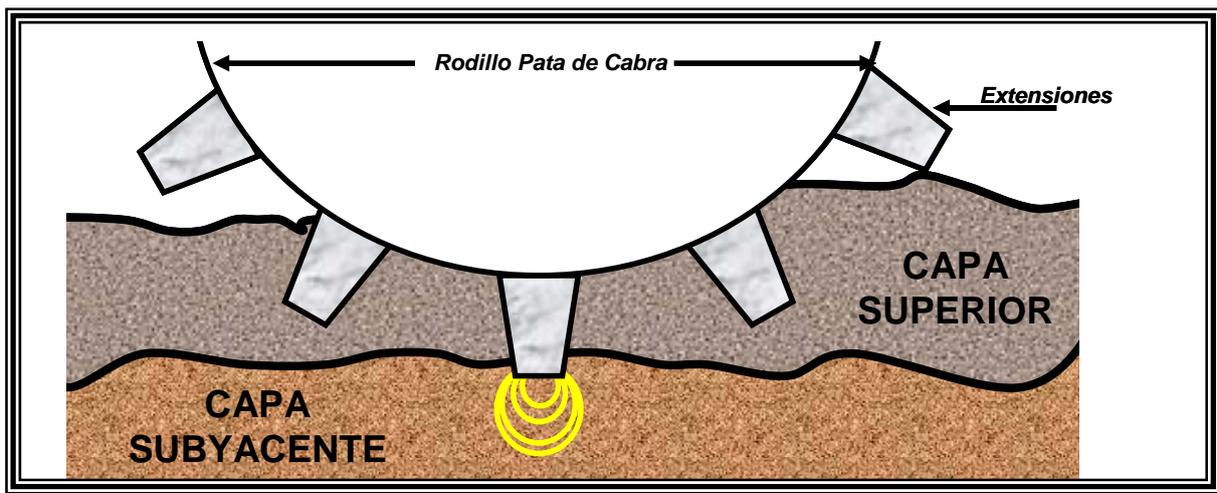
Los compactadores de neumáticos son muy versátiles, y son muy utilizados en construcción pues no tienen las desventajas ya indicadas de las planchas, proporcionan principalmente energía de presión, por lo que son capaces de compactar toda clase de suelos. Modificaremos la gráfica 2, agregando los compactadores neumáticos (Gráfica 3).

ENERGÍA DE COMPACTACIÓN	MATERIAL DE LA CAPA	MATERIALES COHESIVOS O FINOS (ARCILLAS Y LIMOS)	MATERIALES FRICCIONANTES O GRUESOS (GRAVAS Y ARENAS)
PRESIÓN		PLANCHAS	NEUMÁTICOS
AMASAMIENTO			
IMPACTO			
VIBRACIÓN			

**Gráfica 3. Aplicación de los compactadores neumáticos.**

### III. 3. RODILLOS PATA DE CABRA.

Estos equipos consisten en un cilindro metálico del que sobresalen regularmente unas extensiones alargadas. Trabajan por amasamiento y compactan la capa subyacente, no la capa superior, lo que produce terraplenes sin estratificar (Figura 18). Esto hace que el acabado de la capa sea muy malo y sea útil sólo en el cuerpo de los terraplenes.



**Figura 18. Trabajo de la pata de cabra. Obsérvese el pequeño tamaño del bulbo de presión. La compactación se produce más por penetración y amasamiento que por presión.**

La gran ventaja de no estratificar los terraplenes los hizo indispensables, durante muchas décadas, para compactar terraplenes en obras hidráulicas, como el corazón impermeable de una presa de materiales graduados o bordos de contención.

Desafortunadamente tienen una gran resistencia a la tracción, y requieren equipos pesados y costosos para ser jalados. Además su rendimiento es bajo. Por estas razones, y por que hay otros equipos como los compactadores de impacto, que hacen el mismo trabajo sin estas desventajas, el rodillo de pata de cabra ya no es utilizado.

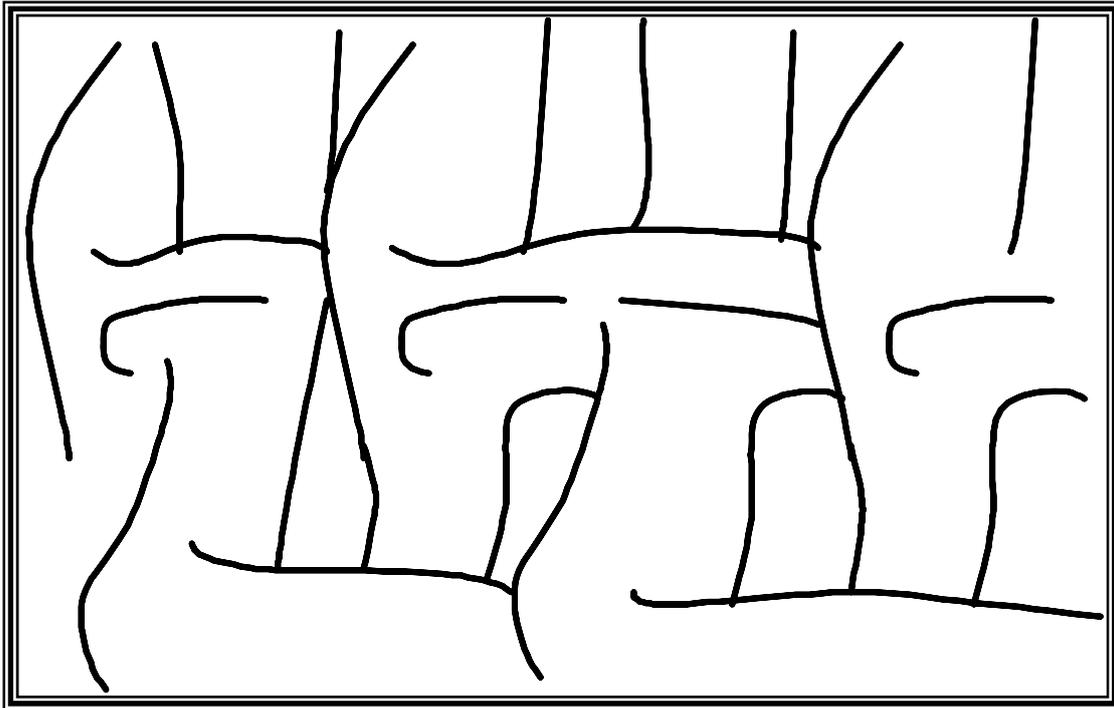
En la figura 19 se muestra un rodillo pata de cabra típico.



**Figura 19. Rodillo Pata de Cabra, jalado por un tractor D-8.**

### **III. 4. RODILLO DE REJA**

Este compactador fue desarrollado originalmente para disgregar 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 llenan los vacíos entre los materiales más gruesos formando una superficie estable. Como una guía; la roca que se puede escarificar también se puede disgregar.

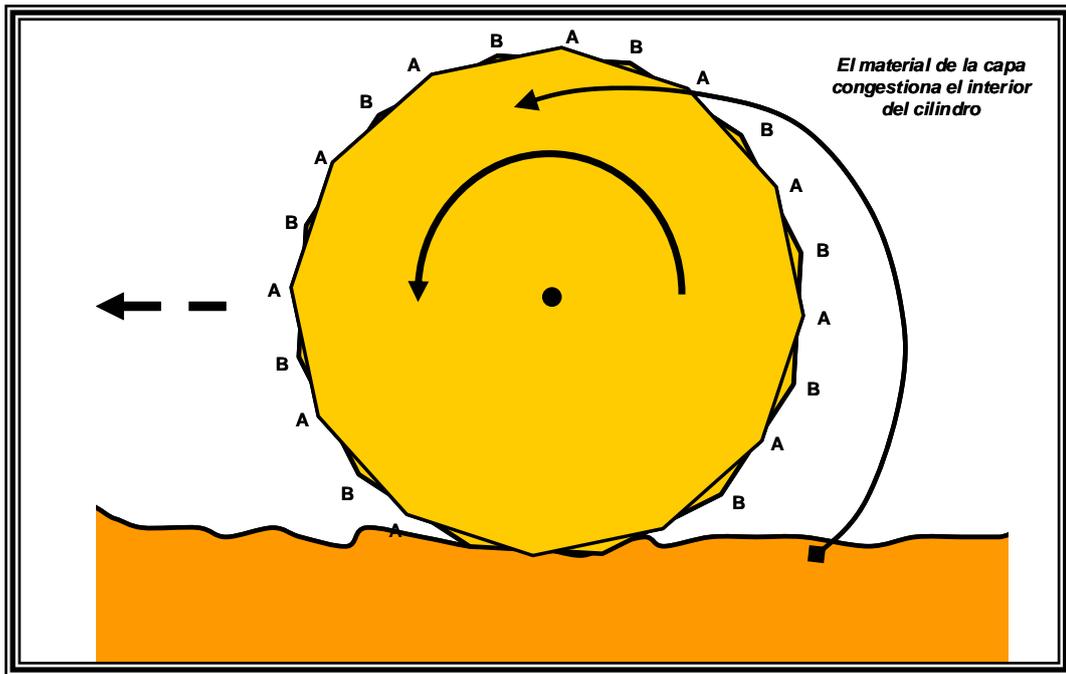


**Figura 20. Configuración de la reja.**

La disposición de la reja es tal que no forma exactamente un cilindro, sino en realidad las crestas de la reja son una serie de puntos altos y bajos dispuestos como un tablero de ajedrez (Figura 20 y 20A) lo que produce un rodamiento no uniforme y un efecto de impacto. Cuando estos rodillos trabajaban a alta velocidad (En compactación 20 km/h es alta velocidad) producen un efecto de amasamiento sobre la capa compactada.

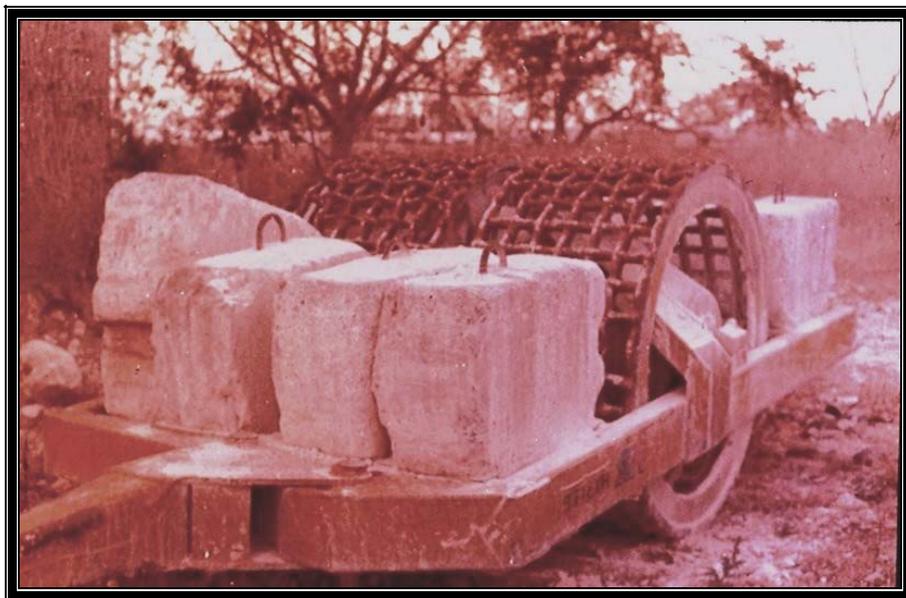
Al ser usado este equipo se encontró que era capaz de compactar eficientemente una gran variedad de suelos por la combinación de energías de impacto y vibración.

Tienen la desventaja de que tienden a atascarse por dentro en materiales finos, lo que reduce un poco su eficiencia por la necesidad de limpiarlos frecuentemente (Figura 20A).



**Figura 20A. Disposición de los puntos altos (A) y bajos (B) en el rodillo de reja.  
Esta alternancia es también en el sentido transversal.**

Están equipados con lugares para colocar lastres que generalmente son bloques de concreto muy pesados. Pero los equipos de compactación se deben usar ligeros y veloces (Figura 20B).



**Figura 20B. Rodillo de Reja.**

Son muy buenos compactadores pero tiene el problema que el acabado de la capa que compactan es pésimo, por lo que su uso se ha limitado al cuerpo de los terraplenes y como éstos generalmente están formados por materiales cohesivos, se ha incluido este equipo en la gráfica 4 sólo para materiales finos, aunque sean capaces de compactar toda clase de suelos.

ENERGÍA DE COMPACTACIÓN	MATERIAL DE LA CAPA	MATERIALES COHESIVOS O FINOS (ARCILLAS Y LIMOS)	MATERIALES FRICCIONANTES O GRUESOS (GRAVAS Y ARENAS)
	PRESIÓN		PLANCHAS
AMASAMIENTO		REJAS	
IMPACTO		REJAS	
VIBRACIÓN			

**Gráfica 4. Aplicación de los rodillos de reja.**

Un caso típico de aplicación lo tenemos en la Península de Yucatán, en donde el casi único material disponible para terraplenes es el **xascab** (Término local para la caliza), material fino y disgregable que sale del banco en bloques.

### III. 5. RODILLO DE IMPACTO (TAMPING ROLLER).

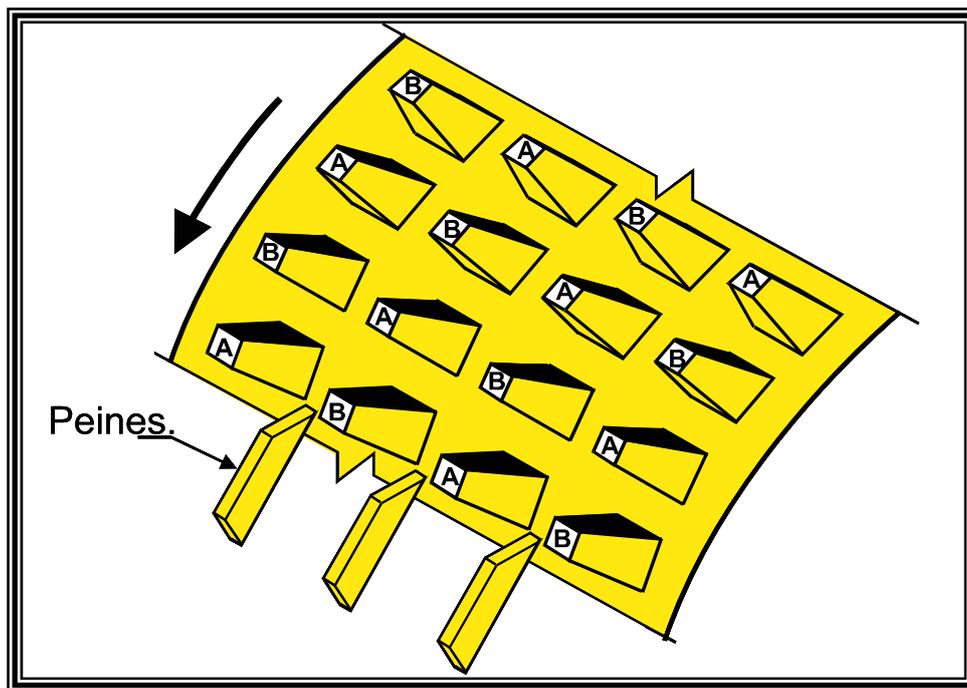
A causa de los problemas de limpieza del rodillo de reja, se diseñó un nuevo rodillo usando el mismo principio: el rodillo de impacto. Este es un rodillo metálico, en el que se han fijado unas salientes en forma aproximada de una pirámide rectangular truncada (Figura 21).

Estas pirámides no son de la misma altura pues hay unas más 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 (Figura 22).

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, sustituyendo totalmente a la pata de cabra.



**Figura 21. Sección de un rodillo de impacto, mostrando la disposición de los puntos altos (A) y bajos (B) de las extensiones, semejante a la distribución del rodillo de reja. También muestra los peines de limpieza.**

Cuando un rodillo de impacto empieza una nueva capa, que no sea mayor de 30 cm proporciona suficiente amasamiento en la capa subyacente para eliminar la estratificación que ocurre con cualquier otro compactador excepto la pata de cabra.

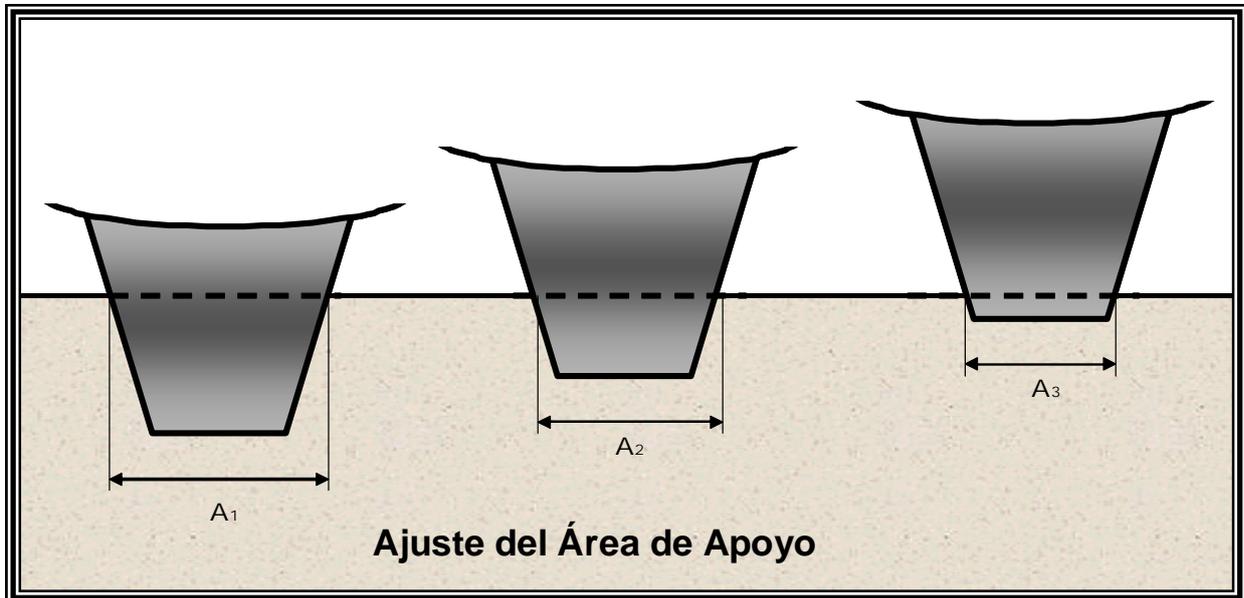


Figura 22.

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 (Figura 23).



Figura 23. Rodillo de Impacto (Tamping Roller)

Estos compactadores son autopropulsados y han demostrado ser muy eficientes y económicos para toda clase de suelos generando amasamiento e impacto. Sin embargo, el acabado de la capa, igual que le rodillo de reja es pésimo, por lo cual en la gráfica 5 lo hemos limitado a materiales cohesivos.

ENERGÍA DE COMPACTACIÓN	MATERIAL DE LA CAPA	MATERIALES COHESIVOS O FINOS (ARCILLAS Y LIMOS)	MATERIALES FRICCIONANTES O GRUESOS (GRAVAS Y ARENAS)
	PRESIÓN		PLANCHAS
AMASAMIENTO		REJA R. DE IMPACTO	
IMPACTO		REJA R. DE IMPACTO	
VIBRACIÓN			

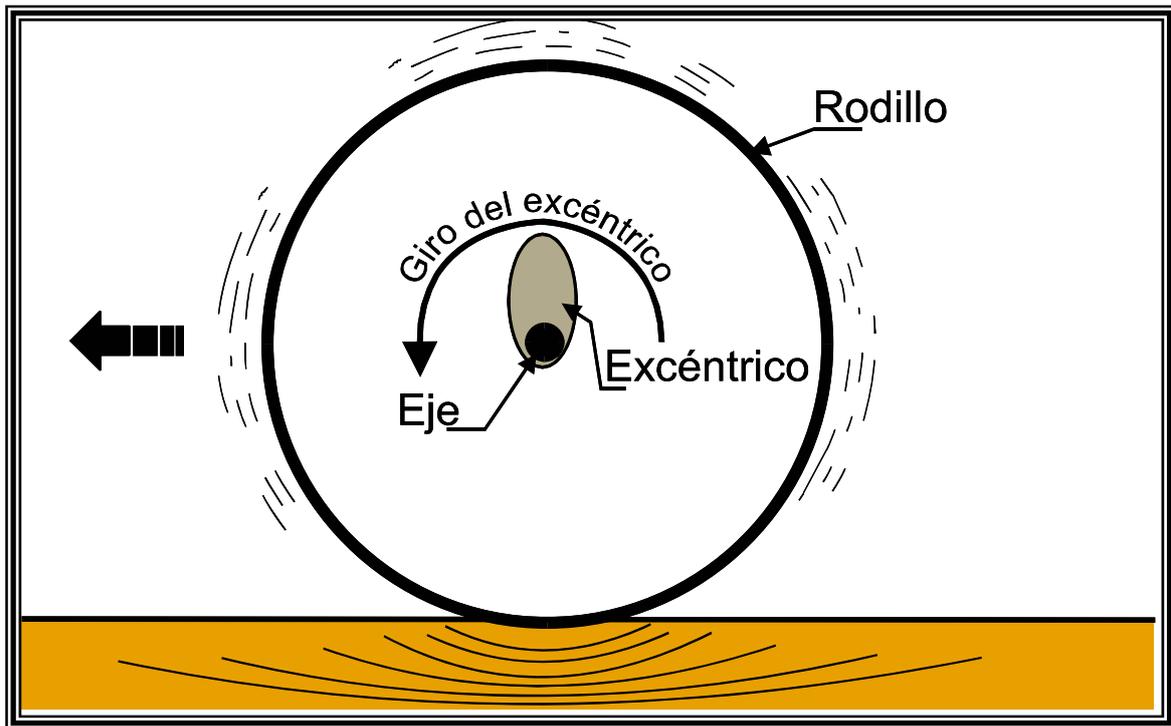
**Gráfica 5. Aplicación de los rodillos de impacto.**

Están equipados con una hoja de empuje que sólo sirve para pequeños movimientos de tierra, pero nunca deben usarse para movimientos generales pues para esto son muy poco eficientes.

Con frecuencia a estos equipos se les llama “*pata de cabra*” por el parecido pero los resultados son diametralmente opuestos.

### III. 6. RODILLOS VIBRATORIOS.

Los rodillos vibratorios consisten en uno o dos rodillos metálicos que tiene en el centro un excéntrico que gira produciendo vibraciones que son transmitidas por contacto a la capa (Figura 24).



**Figura 24. Funcionamiento de un rodillo vibratorio.**

Los hay de dos tipos:

1. De jalón, que tienen que ser arrastrados por una máquina, generalmente un tractor agrícola y que tiene su propio motor para mover el excéntrico.
2. Autopropulsados, que pueden estar formados por dos rodillos vibratorios o por una combinación de un rodillo y neumáticos. En este caso el mismo motor proporciona potencia para el desplazamiento del equipo y para la vibración del o los rodillos.

Estos rodillos funcionan disminuyendo temporalmente la fricción interna del suelo. Como en los suelos granulares (gravas y arenas) su resistencia depende principalmente de la fricción interna (en los suelos plásticos depende de la cohesión) la eficiencia de estos rodillos está 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 (0.50 m).

Estos rodillos pueden producir un gran trabajo de compactación en relación a su peso estático ya que la principal fuente de energía es la fuerza dinámica de compactación (Figura 25).

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 ha aumentado, y se ha disminuido la frecuencia, por lo que producen energía de impacto. 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 20 000 kg o más. Los grandes pueden llegar a sobreesforzar suelos débiles por lo que hay que manejarlos con cuidado.



**Figura 25. Rodillo Vibratorio liso autopulsado, combinado con neumáticos.**

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

Completaremos nuestra gráfica 5 incluyendo los rodillos vibratorios en la gráfica 6.

ENERGÍA DE COMPACTACIÓN	MATERIAL DE LA CAPA	MATERIALES COHESIVOS O FINOS (ARCILLAS Y LIMOS)	MATERIALES FRICCIONANTES O GRUESOS (GRAVAS Y ARENAS)
	PRESIÓN		PLANCHAS
AMASAMIENTO		REJA R. DE IMPACTO	
IMPACTO		REJA R. DE IMPACTO	
VIBRACIÓN			RODILLOS VIBRATORIOS

Gráfica 6. Aplicación de los rodillos vibratorios.

### III. 7. RODILLO PATA DE CABRA VIBRATORIA.

Quizá suene extraño este equipo, ya que se ha dicho anteriormente que la pata de cabra es adecuada para materiales cohesivos y los vibratorios lo son para materiales no cohesivos.

Este equipo es un rodillo semejante al rodillo liso vibratorio, pero tiene extensiones semejantes a los de la pata de cabra y se hace trabajar en alta amplitud y baja frecuencia, por lo que produce energía de impacto. También, por la acción de las extensiones, produce efecto de amasamiento (Figura 26).



**Figura 26. Rodillo Pata de Cabra Vibratoria.**

Este equipo compacta también la capa subyacente pero no la capa superior y no estratifica. Aunque es muy eficiente, con altas producciones, el acabado de la capa es pésimo, por eso se recomienda sólo para el cuerpo del terraplén.

Modificaremos la gráfica 6 incluyendo este equipo, y tendremos la gráfica 7.

ENERGÍA DE COMPACTACIÓN	MATERIAL DE LA CAPA	MATERIALES COHESIVOS O FINOS (ARCILLAS Y LIMOS)	MATERIALES FRICCIONANTES O GRUESOS (GRAVAS Y ARENAS)
	PRESIÓN		PLANCHAS
AMASAMIENTO		REJA R. DE IMPACTO PATA DE CABRA VIBR.	
IMPACTO		REJA R. DE IMPACTO PATA DE CABRA VIBR.	
VIBRACIÓN			RODILLOS VIBRATORIOS

**Gráfica 7. Aplicación de la pata de cabra vibratoria.**

## **IV. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA COMPACTACION.**

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

**IV.1) CONTENIDO DE HUMEDAD DEL MATERIAL.**

**IV.2) GRANULOMETRIA DEL MATERIAL.**

**IV.3) NUMERO DE PASADAS DEL EQUIPO.**

**IV.4) PESO DEL COMPACTADOR.**

**IV.5) PRESION DE IMPACTO.**

**IV.6) VELOCIDAD DEL EQUIPO COMPACTADOR.**

**IV.7) ESPESOR DE CAPA.**

### **IV.1. CONTENIDO DE HUMEDAD.**

El agua tiene en el proceso de compactación el papel lubricante entre las partículas del material. Una falta de humedad exigiría mayor esfuerzo compactivo, así como también exigiría un exceso de la misma.

Debe recordarse (Inciso I.3.A.) 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.

## IV.2. GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL.

Para la obtención de una eficiente compactación es necesario, que haya partículas de todos los tamaños en el material por compactar, ya que las partículas de menor tamaño ocuparán los espacios formados entre partículas mayores.

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.

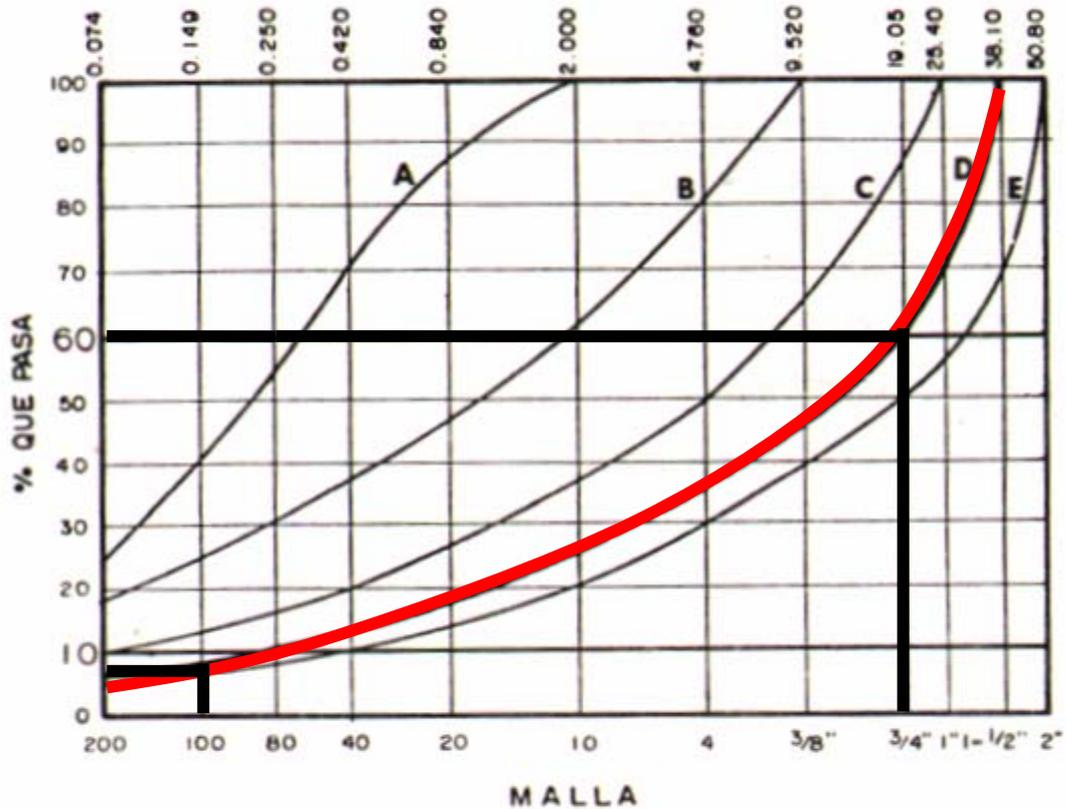
La forma de las partículas es importante en la compactación. Los materiales más fácilmente compactables son aquellos que tienen formas redondeadas, como las gravas y arenas de río. Los materiales con partículas angulosas o alargadas son más difíciles de compactar por los acunamientos entre partículas.

Estudiaremos ahora el Coeficiente de Uniformidad de Lars Forssblad, que es la relación entre el  $D_{60}$  y el  $D_{10}$ .

## COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD. ( Cu )

DE LARS FORSSBLAD.

## GRAFICA DE COMPOSICION GRANULOMETRICA



$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Figura 27.

En donde:

El  $D_{60}$ : Es el tamaño de la malla por el que pasa el 60% del material.

El  $D_{10}$ : 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 tienen 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, podemos observar de la curva (D), el  $D_{60}$  corresponde al material que pasa la malla de  $\frac{3}{4}$ ", tamaño igual a 19.05 mm y el  $D_{10}$  corresponde al material que pasa por la malla 80, tamaño igual a 0.250 mm. Si calculamos el coeficiente de uniformidad tenemos que:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{19.05 \text{ mm}}{0.250 \text{ mm}} = 76.2$$

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

Es oportuno hacer notar que, aunque el coeficiente de Fossblad es un concepto interesante, si el material cumple especificaciones de granulometría (Cuando su curva granulométrica, semejante a la mostrada como "D" en la figura 27, cae dentro de cualquiera de las zonas delimitadas por las curvas "A", "B" o "C", sin cambios de pendiente bruscos) este coeficiente siempre es alto. Por esta razón es raramente usado.

**IV.3. NUMERO DE PASADAS.**

El número de pasadas que un equipo deba dar sobre un material dependerá de (Figura 28):

- A) Tipo de compactador.
- B) Tipo de material.
- C) Contenido de humedad.
- D) Forma en que aplique la presión al material.

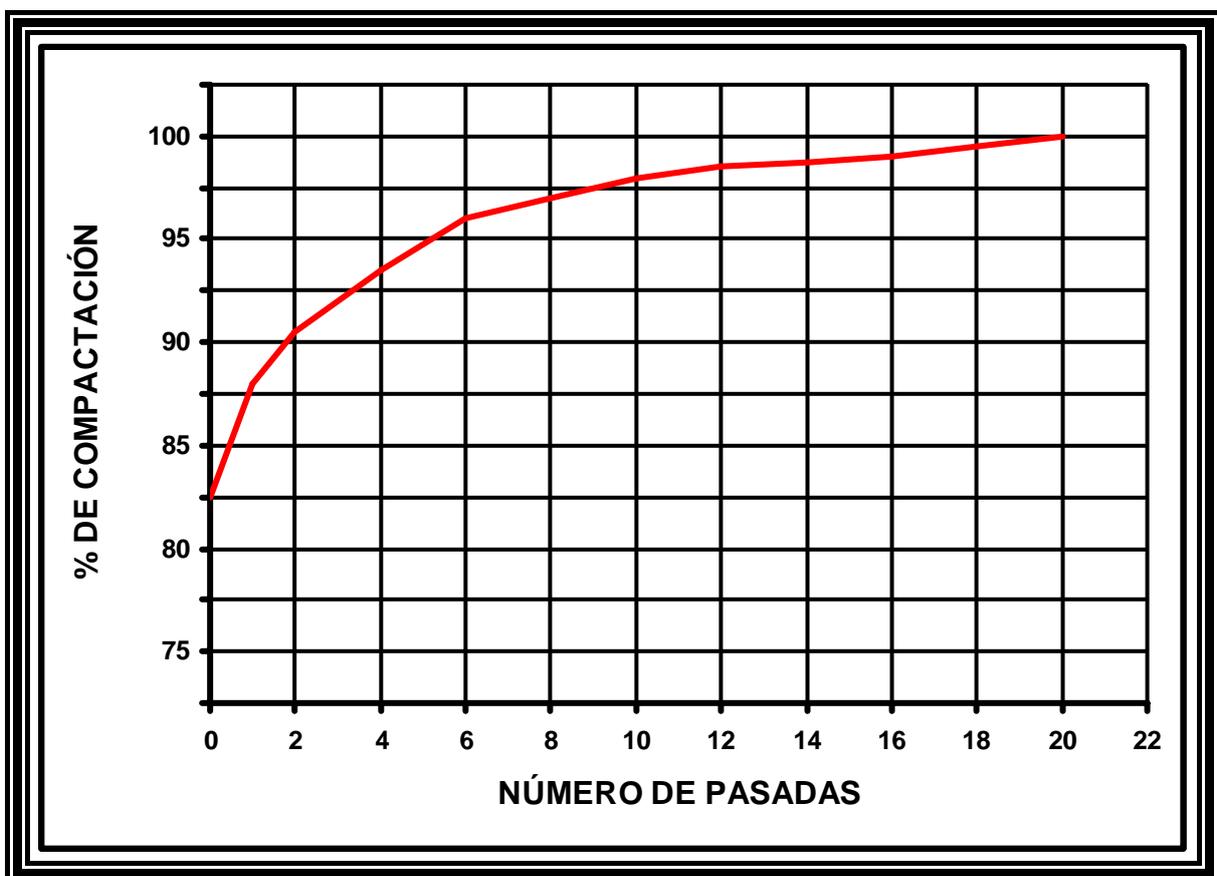


Figura 28.

#### **IV.4. PESO DEL COMPACTADOR.**

La presión ejercida sobre el material dependerá, en parte, del peso del equipo de compactación.

#### **IV.5. PRESION DE CONTACTO.**

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

- A) Tipo de material.
- B) Estado del material (Suelto o 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 porque sus máquinas 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 de neumáticos muy pesado necesita 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.

## **IV.6. VELOCIDADES DE OPERACIÓN.**

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

### **IV.6.1. Rodillos Metálicos y Patas de Cabra.**

Son lentos por naturaleza, entre más rápido mejor, limitados sólo por la seguridad: 3 Km. por hora es un buen máximo.

### **IV.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.

### **IV.6.3. Rodillos Neumáticos.**

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

### **IV.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.

## **V. SELECCIÓN DE COMPACTADORES EN CUANTO A SU FUNCION.**

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

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

### **V.1. Tipo de Material.**

### **V.2. Tamaño de la Obra.**

### **V.3. Requerimientos especiales.**

#### **V.1. TIPO DE MATERIAL.**

En la figura 29, que es una reproducción de la gráfica 7, 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, semicohesivos y no cohesivos, (Los más finos son cohesivos y los granulares no cohesivos) en los renglones 1 y 2 se indica su uso más frecuente:

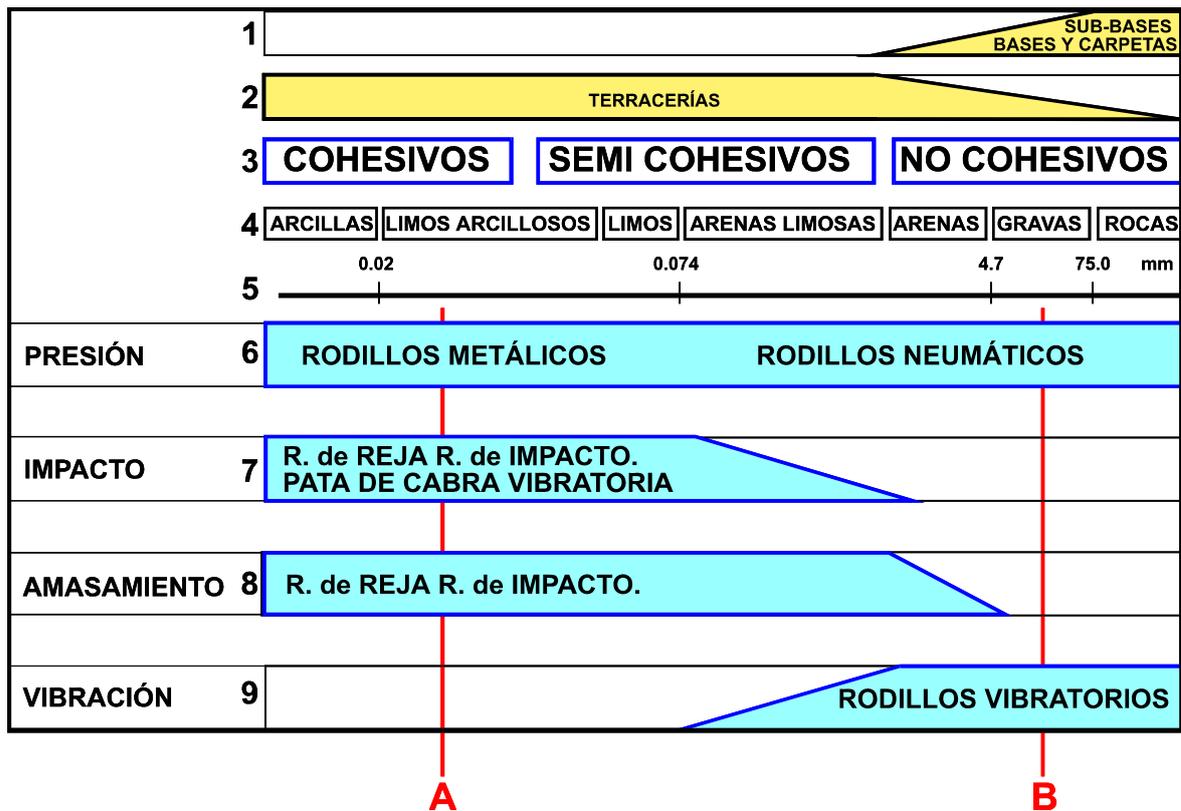
- 1) Sub-bases, bases y carpetas; siempre materiales no cohesivos (Arenas y gravas).
- 2) Terracerías: normalmente materiales cohesivos y semicohesivos, a veces no cohesivos.

En el renglón 6: La compactación por presión estática (Rodillos metálicos y neumáticos) es aplicable a todos los suelos. Limitación: bajo rendimiento en los rodillos metálicos.

En el renglón 7: La compactación por impacto (Rodillo de reja, rodillo de impacto y pata de cabra vibratoria) es 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, y únicamente en el cuerpo del terraplén. Limitación: El rodillo de reja se atasca con los materiales cohesivos y hay que parar frecuentemente para limpiarlo, es un excelente disgregador por lo que el rodillo de reja es extraordinario en terracerías construidas con materiales que necesitan disgregarse.

En el renglón 8: La compactación por amasamiento (Rodillo de reja y rodillo de impacto) como el impacto es 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, y únicamente en el cuerpo del terraplén.

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).



**Figura 29. Selección de equipo de compactación.**

En la práctica es conveniente combinar varias energías de compactación para lograr mejores resultados. En la gráfica de la figura 29 se pueden hacer combinaciones en “A” y en “B” (Líneas rojas).

En la zona de materiales cohesivos (Línea “A”) recordemos que los equipos, de por sí, combinan energías de compactación.

En la zona de materiales no cohesivos (Línea “B”) se ve claramente la combinación de compactadores de neumáticos con compactadores vibratorios. Esta es una combinación muy eficiente, por ello, en la mayoría de los trabajos de pavimentación vemos esta combinación de equipos.

## **V.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 tamaño y número de compactadores necesarios para cumplir con el plazo estipulado, al mínimo costo.

## **V.3. REQUERIMIENTOS ESPECIALES.**

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

Debemos tener en mente que, en construcción pesada, la inversión en equipo es cuantiosa y que este 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.

## VI. REGLAS A SEGUIR EN CASO DE TENER PROBLEMAS CON LA COMPACTACIÓN.

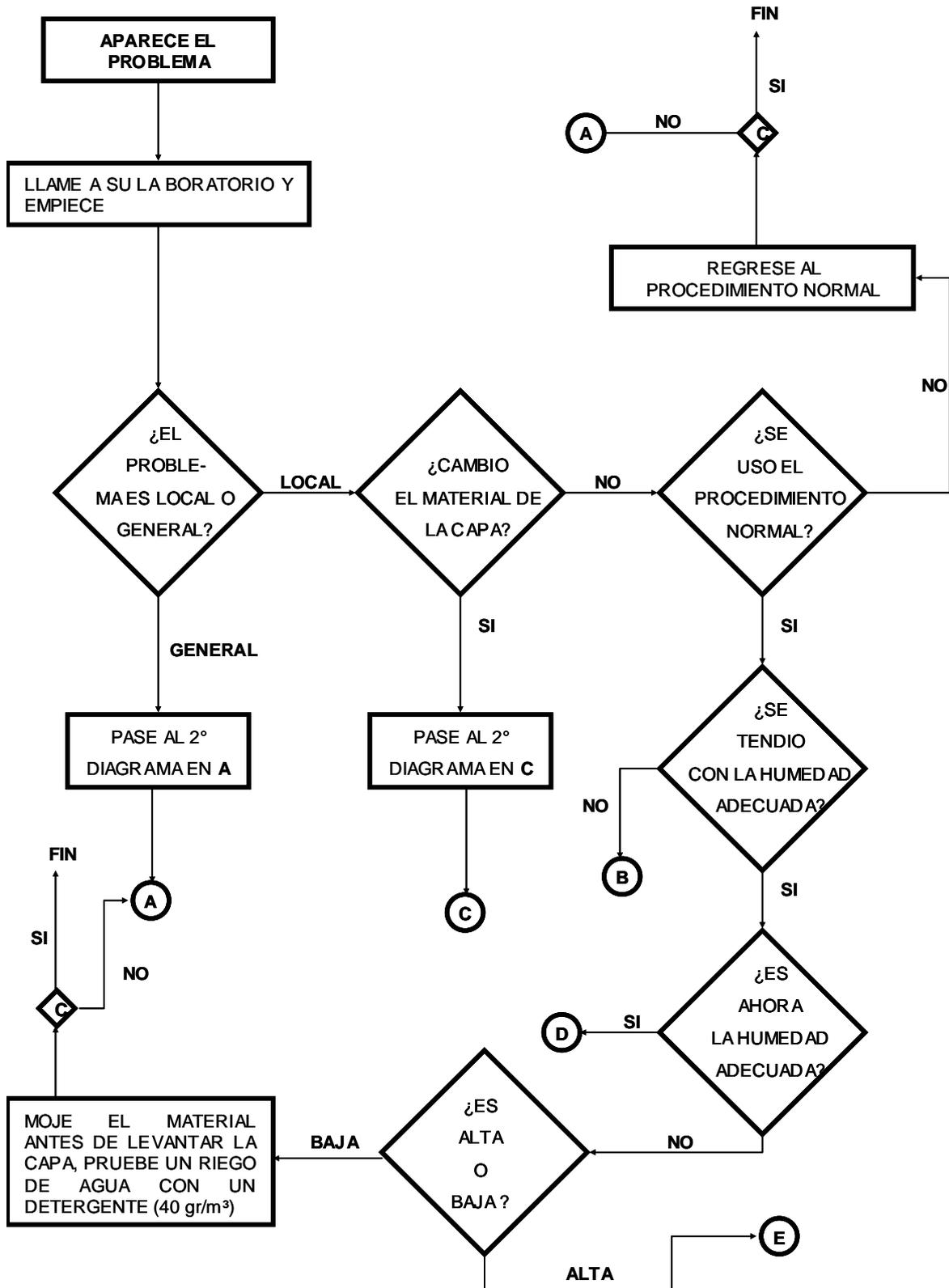
¿Qué hacer cuando el control nos indica una falla?

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.

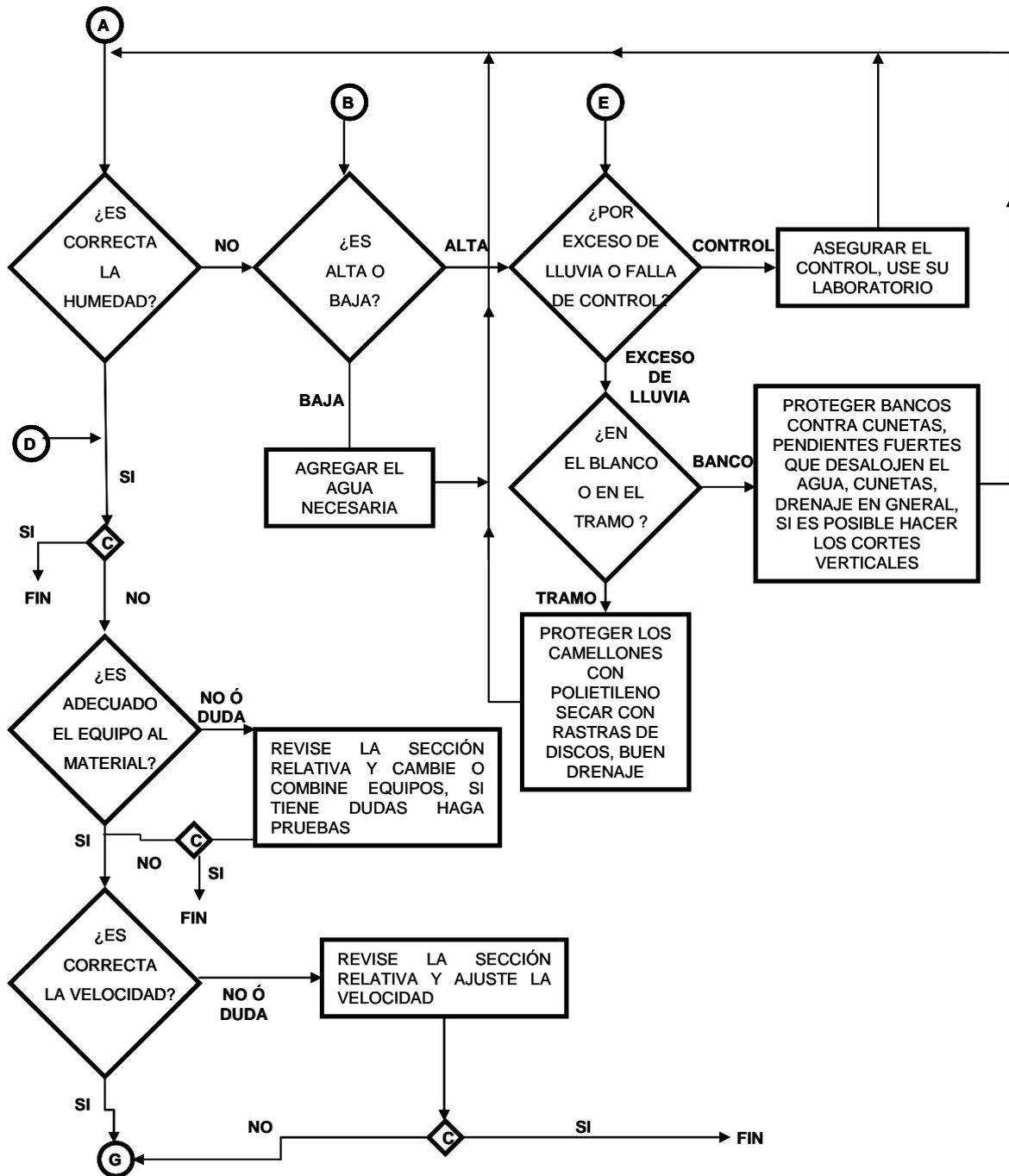
En estos diagramas se usan los siguientes símbolos:

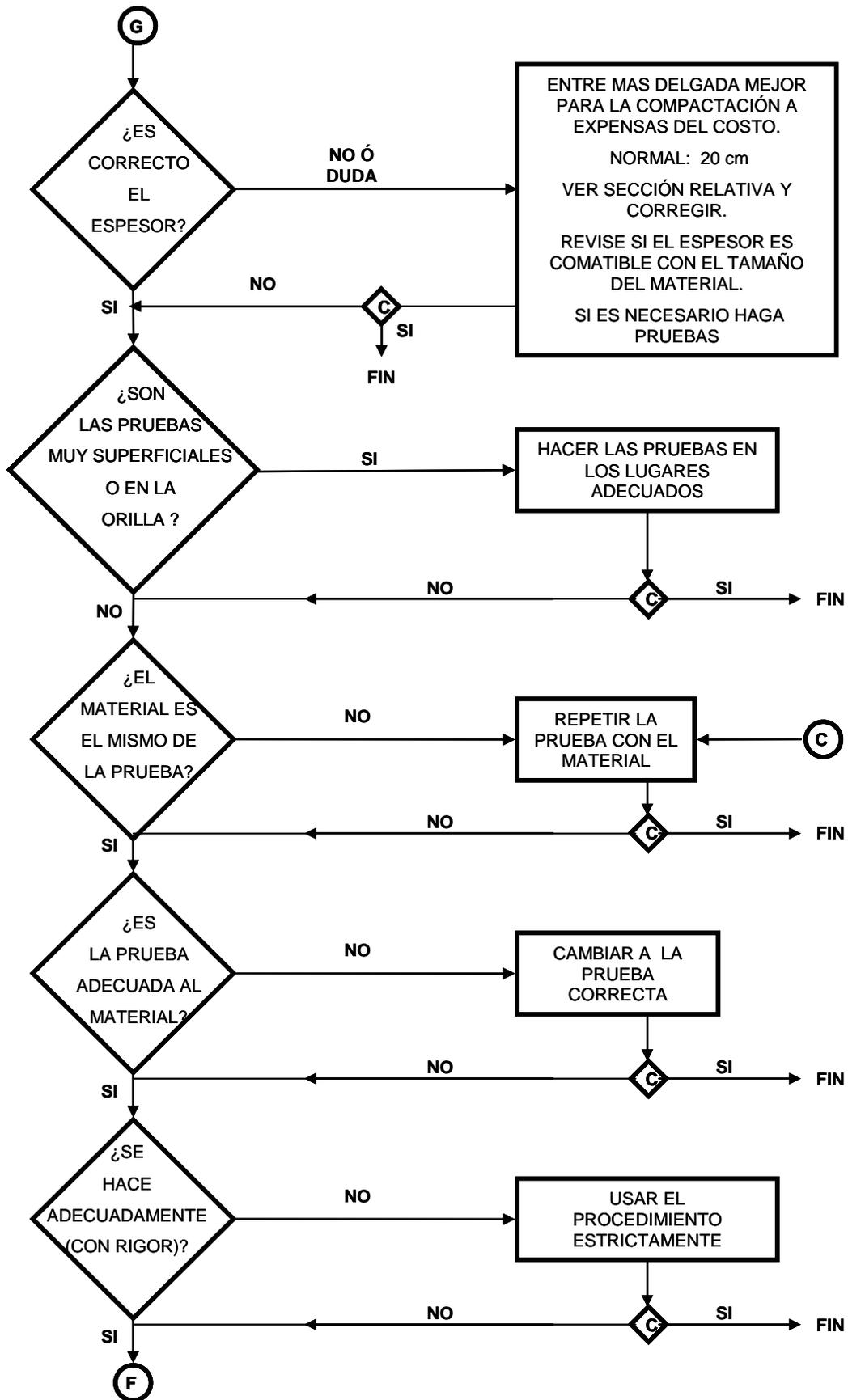


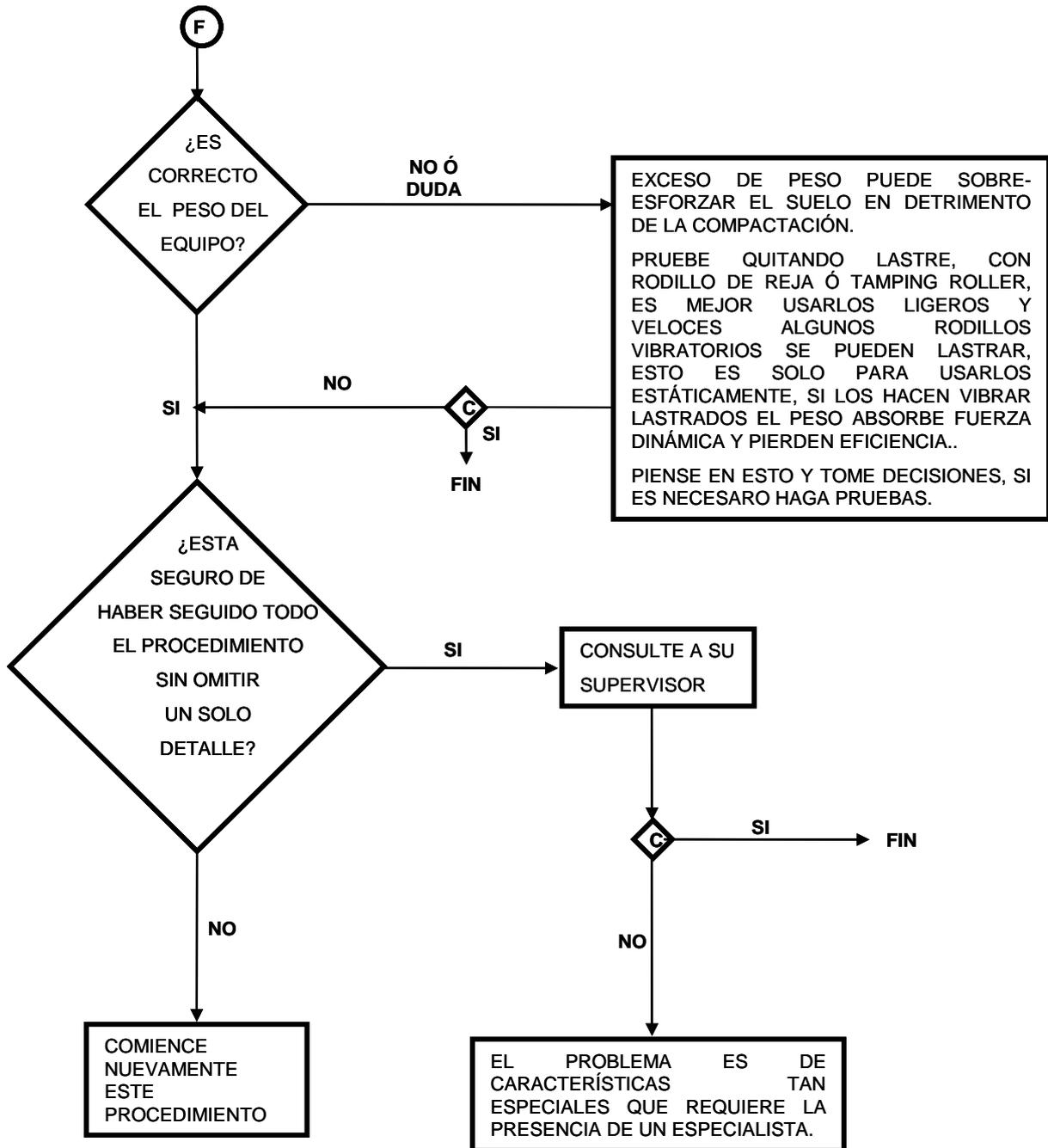
PRIMER DIAGRAMA



SEGUNDO DIAGRAMA







## VII. SELECCIÓN DEL EQUIPO DE COMPACTACION EN CUANTO AL RENDIMIENTO Y AL COSTO DE LA COMPACTACIÓN.

### VII.1. RENDIMIENTO.

En la figura 30 se muestra un compactador cubriendo una franja de la capa a compactar. Los compactadores generalmente no cubren todo el ancho de la capa, por lo que se compacta por franjas.

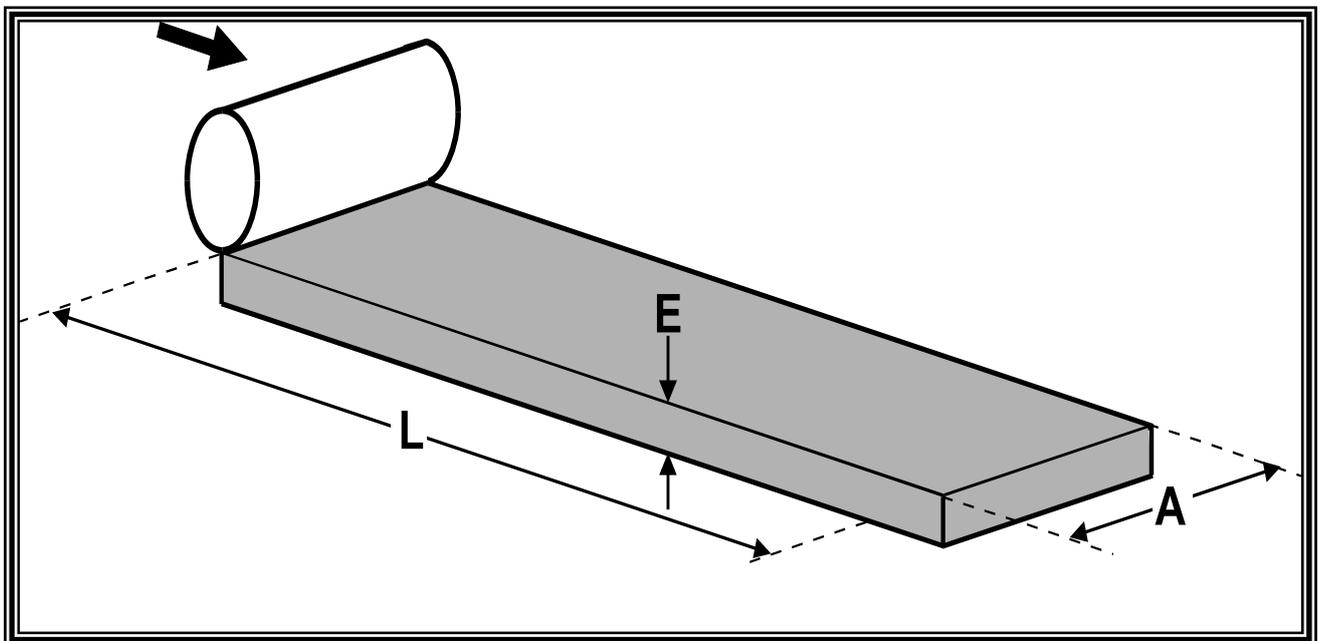


FIGURA 30. Compactador trabajando sobre una franja a compactar.

L = Distancia recorrida en una hora = Velocidad = V

A = Ancho cubierto por el compactador. No es el ancho de la máquina, pues siempre hay un pequeño traslape entre franjas.

E = Espesor de la capa (Generalmente el espesor compactado).

C = Eficiencia (Puede variar de 0.6 a 0.7, adimensional).

El área cubierta por el compactador en una hora es:

$$\text{Área} = L \times A$$

Y el volumen es:

$$\text{Volumen} = V \times A \times E$$

Como hay que dar un cierto número (N) de pasadas para alcanzar el grado especificado de compactación, el volumen compactado por hora (Rendimiento=R) será:

$$R = \frac{V \times A \times E}{N}$$

Este volumen por hora es el rendimiento teórico ( $R_T$ ). Para obtener el rendimiento real (R) se multiplica por la eficiencia (C):

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

En la práctica se usan las siguientes unidades:

R = Rendimiento (Volumen compactado en m<sup>3</sup>/hora).

L = Velocidad en Km/h.

A = Ancho en m.

E = Espesor de la capa en cm.

Para obtener el rendimiento en metros cúbicos por hora usando estas unidades multiplicamos por un factor de conversión de unidades igual a 10, y la expresión para el rendimiento queda:

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

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

## VII.2. ESPESORES DE CAPA Y NÚMERO DE PASADAS.

Estas dos variables dependen del tipo y cantidad de energía que el compactador es capaz de transmitir al suelo.

Entre más delgada la capa es mejor para la compactación pues aumenta la energía específica aplicada, pero una capa muy delgada disminuye la producción de la misma compactación y multiplica el trabajo de mezclado y tendido del material.

En la siguiente tabla se muestran los espesores de capa (E) y el número de pasadas (N) típicos para los diferentes equipos y que usaremos en adelante. Estos son números generales que, en la práctica, habrá que ajustar ligeramente en cada caso.

<b>EQUIPO</b>	<b>PROFUNDIDAD DE LA CAPA (cm) (E)</b>	<b>No. DE PASADAS (N)</b>	
		<b>PARA 90%</b>	<b>PARA 95%</b>
<b>RODILLO METALICO</b>	10 A 20	7 A 9	10 A 12
<b>NEUMÁTICO LIGERO</b>	15 A 20	5 A 6	8 A 9
<b>NEUMÁTICO PESADO</b>	HASTA 70	4 A 5	6 A 8
<b>RODILLO DE IMPACTO</b>	20 A 30	5 A 6	6 A 8
<b>RODILLO DE REJA</b>	20 A 25	6 A 7	7 A 9
<b>PATA DE CABRA VIBRATORIA</b>	20 A 30	3 A 5	6 A 7
<b>LISO VIBRATORIO</b>	20 A 30	<b>VER GRAFICA SIGUIENTE</b>	

### VII.3. VELOCIDAD DE OPERACIÓN.

De la ecuación del rendimiento de un compactador se deduce que entre más veloces mayor es el rendimiento. Sería ideal operarlos siempre a alta velocidad (Alta velocidad en compactación es 20 Km/h), pero algunos, por su peso o características no pueden alcanzar esta velocidad.

En el caso particular del rodillo liso vibratorio la velocidad no debe superar los 6 Km/h. En caso contrario desprendería partículas del material de la capa, en detrimento de la compactación.

En la siguiente tabla se muestran las velocidades de operación usuales en el trabajo de los equipos de compactación:

<b>EQUIPO</b>	<b>VELOCIDAD (Km/h)</b>
<b>PLANCHA 3 RUEDAS</b>	<b>2 A 3</b>
<b>PLANCHA TANDEM</b>	<b>3 A 4</b>
<b>NEUMÁTICOS DE LLANTAS PEQUEÑAS</b>	<b>10 A 15</b>
<b>NEUMÁTICOS DE LLANTAS GRANDES</b>	<b>10 A 12</b>
<b>RODILLO DE REJA</b>	<b>15 A 20</b>
<b>RODILLO DE IMPACTO</b>	<b>15 A 20</b>
<b>RODILLO LISO VIBRATORIO</b>	<b>5 A 6</b>
<b>PATA DE CABRA VIBRATORIA</b>	<b>8 A 10</b>

#### **VII.4. COSTOS.**

Para la determinación del costo horario del equipo de compactación se siguen los mismos pasos que se siguen para la determinación de cualquier otro costo horario de equipo de construcción.

Es decir se deben obtener:

A) Cargos fijos.

- Depreciación
- Intereses
- Seguros
- Almacenaje
- Mantenimiento

B) Consumos

- Combustibles
- Lubricantes
- Llantas

C) Operación

D) Transporte

Sumando,

A) Cargos fijos

B) Consumos

C) Operación

D) Transporte

Determinado el costo horario del equipo y conociendo la producción del mismo, para un cierto grado de compactación, se puede obtener el costo por (m<sup>3</sup>) compactado:

$$\text{Costo por m}^3 = \frac{\text{costo horario por equipo}}{\text{producción horaria por equipo}}$$

## VII.5. EJEMPLOS.

### Ejemplo 1:

Consideremos un material para base con tamaño máximo de 1 ½", como se trata de un material friccionante, un compactador vibratorio es el indicado.

Se analizan las siguientes alternativas:

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

### I. Determinación de costo horario.

#### 1. Rodillo liso vibratorio arrastrado por tractor agrícola

Precio de adquisición del rodillo \$ 1,100,000.00

Precio de adquisición del tractor \$ 840,000.00

Se considera una vida útil del conjunto de 8000 horas y un valor de rescate de cero.

Cargos fijos	\$ 612.00
Consumos	\$ 36.00
<u>Operación</u>	<u>\$ 72.00</u>
	\$ 720.00

## 2. Rodillo sencillo liso vibratorio autopropulsado

Precio de adquisición del rodillo \$ 2,400,000.00.

Se considera también una vida útil de 8000 horas y un valor de rescate de cero.

Cargos fijos	\$ 672.00
Consumos	\$ 36.00
<u>Operación</u>	<u>\$ 72.00</u>
	\$ 780.00

## 3. Rodillo Tandem vibratorio autopropulsado

Precio de adquisición del rodillo \$ 4,300,000.00

Se considera también una vida útil de 8000 horas y un valor de rescate de cero.

Cargos fijos	\$ 1,150.00
Consumos	\$ 52.00
<u>Operación</u>	<u>\$ 72.00</u>
	\$ 1,274.00

## II. Determinación de producciones horarias.

### 1. Rodillo liso vibratorio arrastrado por tractor agrícola

Ancho = 1.50 m

Velocidad = 4 Km/h

Espesor = 20 cm (suelos)

Número de pasadas = 4 para 95%

Coefficiente de reducción = 0.7

Eficiencia = 0.75

$$R = \frac{1.50 \times 4 \times 20 \times 0.7 \times 10}{4} \times 0.75$$

$$R = 157 \text{ m}^3/\text{hora}$$

### 2. Rodillo sencillo liso vibratorio autopropulsado

Ancho = 2.14 m

Velocidad = 4.5 Km/h

Espesor = 20 cm (suelos)

Número de pasadas = 4 para 95%

Coefficiente de reducción = 0.7

Eficiencia = 0.75

(Es de mayor maniobrabilidad y de mayor energía dinámica).

$$R = \frac{2.14 \times 4.5 \times 20 \times 0.7 \times 10}{4} \times 0.75$$

$$R = 253 \text{ m}^3/\text{hora}$$

### 3. Rodillo Tandem vibratorio autopropulsado

Ancho = 1.50 m

Velocidad = 4 Km/h

Espesor = 20 cm (suelos)

Número de pasadas = 2 (por ser  
dos rodillos)

Coefficiente de reducción = 0.8

Eficiencia = 0.75

$$R = \frac{1.50 \times 4 \times 20 \times 0.8 \times 10}{2} \times 0.75$$

$$R = 315 \text{ m}^3/\text{hora}$$

### III. Determinación de costo de compactación.

	COSTO HORARIO	RENDIMIENTO	COSTO PRODUCCIÓN X m <sup>3</sup>
<b>Caso 1</b>	\$ 720.00/h	157 m <sup>3</sup> /h	\$ 4.59/m <sup>3</sup>
<b>Caso 2</b>	\$ 780.00/h	253 m <sup>3</sup> /h	\$ 3.08/m <sup>3</sup>
<b>Caso 3</b>	\$ 1,274.00/h	315 m <sup>3</sup> /h	\$ 4.36/m <sup>3</sup>

Se hace notar que a pesar de que la diferencia de valor de adquisición entre los casos (1) y (3) es de 280% aproximadamente, se obtiene un ahorro en el caso (3), del costo de compactación, cercano al 5%.

**Ejemplo 2:**

Suponiendo que se contara con un compactador de impacto autopulsado, con un costo horario de \$ 1,240.00 y se tratara de compactar un terraplén al 95%, se obtiene:

PRODUCCIÓN HORARIA:

Ancho	= 1.20 m
Velocidad	= 10 Km/hora
Espesor	= 20 cm (suelos)
Número de pasadas	= 4 pasadas (contando sus 2 ejes)
Coefficiente de reducción	= 0.7
Eficiencia	= 0.60

$$RENDIMIENTO = \frac{10 \times 10 \times 1.20 \times 20 \times 0.7 \times 0.6}{4} = 252 \text{ m}^3 / h$$

$$COSTO UNITARIO DE LA COMPACTACIÓN = \frac{\$1240.00 / h}{252 \text{ m}^3 / h} = 4.92 \$ / \text{m}^3$$

**PREGUNTAS:**

1. ¿Cuántas planchas Tandem son necesarias para compactar 300 m<sup>3</sup> compactos por hora?
2. ¿Cuántos rodillos vibratorios son necesarias para compactar 300 m<sup>3</sup> compactos por hora?
3. ¿Cuál equipo proporcionará una compactación más económica?

Se determinan primero las producciones horarias de los equipos.

A) Plancha Tandem

$$P = [(1.20 \times 2 \times 12 \times 10)/11] \times 0.70$$

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

B) Rodillo vibratorio

$$P = [(1.50 \times 4 \times 25 \times 10)/4] \times 0.70$$

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

RESPUESTAS:

1. Se necesitan tantas planchas como:

$$[(300 \text{ m}^3/\text{h} / 18.3\text{m}^3/\text{h})] = 16 + = 17 \text{ planchas}$$

Se pueden utilizar 16 unidades, pero con utilización óptima que frecuentemente resulta difícil de obtener.

Se necesitan usar 17 unidades, lo cual es totalmente impracticable.

2. Los rodillos vibratorios necesarios son:

$$[(300 \text{ m}^3/\text{h} / 262 \text{ m}^3/\text{h})] = 1.14 + = 2 \text{ rodillos}$$

3. Determinación del costo de compactación:

A) Planchas Tandem (6-8 Ton)

$$\text{Costo} = \frac{\text{Costo horario}}{\text{Producción}}$$
$$\text{Costo} = \frac{\$ 400.00/\text{h}}{18.3 \text{ m}^3 / \text{h}} = \$ 21.85 / \text{m}^3$$

Costo que es muy elevado ¡!

B) Rodillos vibratorios

$$\text{Costo} = \frac{\$ 1000.00/\text{h}}{262 \text{ m}^3 / \text{h}} = \$ 3.82 / \text{m}^3$$

Costo que es razonable.

## **VIII. EL CONCEPTO DE MODULO DE RESILIENCIA EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS. EL CASO DE LOS SUELOS Y MATERIALES GRANULARES.**

El módulo de resiliencia es la medida de la capacidad de un material para absorber energía sin peligro de ser deformado permanentemente.

En un artículo publicado en las “Notas” del Instituto Mexicano del Transporte en noviembre del 2001, con el mismo título de este capítulo, se describen algunos conceptos que, con el tiempo, pudieran afectar la selección de equipos y los procedimientos de la compactación.

Específicamente al hablar de compactación de arcillas se concluye que la compactación realizada con altos grados de saturación (85%) incrementa la resistencia del suelo. Recordemos que cuando se construyeron los tanques de aguas superficiales en la Carbonífera de Río Escondido, Coahuila, se aplicó este sistema con resultados antieconómicos.

Menciona también que, en suelos arcillosos, cuando se aplica energía de amasamiento, las partículas alargadas de la arcilla tienden a alinearse en forma paralela (Estructura dispersa) y cuando se aplica energía de presión las partículas asumen un arreglo al azar (Estructura floculada). Esta es una buena explicación de cómo actúa la energía de amasamiento al compactar el suelo.

El artículo mencionado trata en forma muy general la influencia del módulo de resiliencia en el diseño de pavimentos, mencionando la guía AASHTO de 1986.

La importancia de este capítulo es resaltar que si el módulo de resiliencia ha modificado el diseño de pavimentos, es probable que, con el tiempo y con más investigación, pudiera también modificar las especificaciones, los métodos y equipos de compactación.

**Conclusión:**

Como ingenieros debemos estar preparados para aceptar las nuevas tecnologías que se desarrollen y mejoren nuestro trabajo y no establecernos inmutables en la primera forma como aprendimos a hacer las cosas. Seamos creativos.

## **IX. CONCLUSIONES.**

La compactación de suelos es el proceso artificial por el cual las partículas de suelo son obligadas a estar más en contacto las unas con las otras, mediante una reducción del índice de vacíos, empleando medios mecánicos, lo cual se traduce en un mejoramiento de sus propiedades ingenieriles.

La importancia de la compactación de suelos estriba en el aumento de la resistencia y disminución de la capacidad de deformación que se obtiene al someter el suelo a técnicas convenientes, que aumentan el peso específico seco, disminuyendo sus vacíos. 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, bordes de defensas, muelles, pavimentos, etc.

Los métodos empleados para la compactación de suelos dependen del tipo de materiales con que se trabaje en cada caso; en los materiales puramente friccionantes como la arena, los métodos vibratorios son los más eficientes, en tanto que en suelos plásticos el procedimiento de carga estática resulta el más ventajoso. En la práctica, estas características se reflejan en el equipo disponible para el trabajo, tales como: rodillos vibratorios, rodillos lisos, neumáticos o patas de cabra.

La eficiencia de cualquier equipo de compactación depende de varios factores y para poder analizar la influencia particular de cada uno, se requiere disponer de procedimientos estandarizados que reproduzcan en laboratorio la compactación que se puede obtener in situ con el equipo disponible. De entre todos los factores que influyen en la compactación, podría decirse que dos son los más importantes: el contenido de agua del suelo, antes de iniciarse el proceso de compactación y la energía específica, empleada en dicho proceso. Por energía específica se entiende la energía de compactación suministrada al suelo por unidad de volumen.

## **BENEFICIOS DE LA COMPACTACIÓN.**

**a. Aumenta la capacidad para soportar cargas:** Los vacíos producen debilidad del suelo e incapacidad para soportar cargas pesadas. Estando reducido el espacio entre las partículas, el suelo puede soportar cargas mayores, debido a que las partículas mismas que soportan mejor.

**b. Impide la futura deformación del suelo:** Si la estructura se construye en el suelo sin afirmar o afirmado con desigualdad, el suelo se hunde dando lugar a que la estructura se deforme (asentamientos diferenciales). Donde el hundimiento es mas profundo en un lado o en una esquina, por lo que se producen grietas o un derrumbe total.

**c. Reduce la permeabilidad del suelo:** Un suelo compactado reduce la penetración de agua. El agua escurre y el drenaje puede entonces regularse.

**d. Reduce el esponjamiento y la contracción del suelo:** Si hay vacíos, el agua puede penetrar en el suelo y llenar estos vacíos. El resultado seria el esponjamiento del suelo durante la estación de lluvias y la contracción del mismo durante la estación seca.

## **RESUMEN:**

- La forma de mejorar los elementos mecánicos en un suelo es la compactación.
- Los efectos más importantes que produce una buena compactación en un suelo son: Resistencia mecánica, minimización de asentamientos y reducción de la permeabilidad.
- El factor de mayor importancia para dar una compactación óptima en un suelo, es el contenido de humedad de material.

- Los esfuerzos de compactación pueden transmitirse al suelo por la combinación de uno o más de los siguientes efectos: Presión estática, impacto, vibración y amasamiento.
- El compactador que deba usarse dependerá básicamente del tipo de suelo que se quiera compactar (Figura 29).
- La selección de compactadores deberá hacerse con mucho cuidado y tratando de hacer intervenir las variables ya que de esto dependerá el éxito económico y funcional de la compactación.
- De un buen control depende que la compactación se lleve a cabo correctamente.

## BIBLIOGRAFIA.

- Breve Descripción del Equipo Usual de Construcción. FUNDEC.
- Apuntes del Curso Movimiento de Tierras. DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA. FACULTAD DE INGENIERIA. UNAM.
- Apuntes del Curso Pavimentos. DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA. FACULTAD DE INGENIERIA. UNAM.
- Vibratory Soil and Rock Fill Compactation. LARS FORSSBLAD.
- Excavation Handbook. CHURCH.
- Construction Methods. STUBBS.
- Practices and Methods of Contruction. J. STEIMBERG, M. STEMPEL
- Guide to Hyster compactation. HYSTER.
- Manual de Rendimiento. CATERPILLAR.
- Rodillos Vibratorios. INDUSTRIA DEL HIERRO.
- Technical Aspects of Compactation in Earthmoving and Rock Construction. CLARK EQUIPMENT CO.
- Compactación de Terracerías. M.D.MORRIS.
- Catálogo de maquinaria. DYNAPAC.
- Compactación Vibratoria en la Construcción de Carreteras, Aeropuertos, Presas y Otros Proyectos. DYNAPAC.
- Manual de Compactação Vibratoria. DYNAPAC.
- Vibroteknic. DYNAPAC.
- Manual de Compactación Vibratoria. DYNAPAC.
- Conferencia Sobre Compactación. ING. JAVIER BARAJAS MOLINA.
- Apuntes del Autor en Varias Conferencias.
- Tesis Profesional. ALVARO ORTIZ FERNANDEZ.
- Tesis Profesional. ALEJANDRO PONCE SERRANO.