



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**MAQUINARIA UTILIZADA PARA LA COMPACTACIÓN DEL SUELO EN
ÁREAS DE TAMAÑO LIMITADO**

Juan Pablo Alvarez Haase
Asesorado por Ing. Edgar Nehemías Monterroso Pérez

Guatemala, abril de 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MAQUINARIA UTILIZADA PARA LA COMPACTACIÓN DEL SUELO EN
ÁREAS DE TAMAÑO LIMITADO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA

FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JUAN PABLO ALVAREZ HAASE

ASESORADO POR: ING. EDGAR NEHEMIÁS MONTERROSO PÉREZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, ABRIL DE 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Isuur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
EXAMINADOR	Ing. Calixto Monteagudo Cordero
EXAMINADOR	Ing. Luis Estuardo Saravia Ramírez
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

MAQUINARIA UTILIZADA PARA LA COMPACTACIÓN DEL SUELO EN ÁREAS DE TAMAÑO LIMITADO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 28 de febrero de 2005.

Juan Pablo Alvarez Haase

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. INFORMACIÓN GENERAL	1
1.1 Definiciones	1
1.1.1 Compactación	1
1.1.2 Curva de compactación	1
1.2 Conocimientos sobre la compactación del suelo	3
1.2.1 Efectos de compactación sobre el suelo	3
1.2.1.1 Densificación	3
1.2.1.2 Absorción e hinchamiento	6
1.2.1.3 Permeabilidad	7
1.2.1.4 Resistencia a cargas y deformaciones	8
2. INFLUENCIA DE LA COMPACTACIÓN SOBRE EL SUELO	11
2.1 Influencia de la compactación sobre las propiedades del suelo	11
2.1.1 Reducción en la compresibilidad	11

2.1.2	Aumento en la resistencia	12
2.1.3	Disminución de la permeabilidad	13
2.2	Compactación del suelo	13
2.2.1	Fundamentos de la compactación	14
2.2.2	Beneficios de la compactación	16
2.2.3	Factores que influyen en la compactación	17
3.	MÉTODOS Y MÁQUINAS PARA COMPACTAR	19
3.1	Métodos de compactación	19
3.1.1	Compactación por peso estático	19
3.1.2	Compactación por amasamiento	21
3.1.3	Compactación por impacto	25
3.1.4	Compactación por vibración	27
3.2	Tipos de máquinas y su selección	32
3.2.1	Planchas vibrantes	36
3.2.1.1	Clasificación y descripción	38
3.2.1.2	Eficacia y campo de aplicación	41
3.2.1.2.1	Factores de diseño importantes de las planchas vibratoras	41
3.2.1.3	Ventajas y desventajas	43
3.2.2	Rodillos vibrantes	44
3.2.2.1	Clasificación y descripción	44
3.2.2.2	Eficacia y campo de aplicación	51
3.2.2.3	Ventajas y desventajas	53
3.2.3	Apisonadores	55

3.2.3.1	Clasificación y descripción	57
3.2.3.2	Eficacia y campo de aplicación	63
3.2.3.3	Ventajas y desventajas	64
3.3	Control de la compactación	77
3.3.1	Control de las características del suelo en el campo	77
3.3.2	Controles sobre el compactador	79
3.3.2.1	Método del número de pasadas con un espesor de capa	80
4.	COSTO DE LA COMPACTACIÓN	83
4.1	Mantenimiento del equipo	83
4.1.1	Apisonadores	83
4.1.2	Planchas vibradoras	85
4.1.3	Rodillos	87
4.2	Costo de la compactación	88
	CONCLUSIONES	95
	RECOMENDACIONES	97
	BIBLIOGRAFÍA	99

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Curva de compactación	3
2	Relación entre la resistencia, el contenido de humedad y el peso unitario seco de una arcilla arenosa	12
3	Efecto de puente	22
4	Inversión del desviador de esfuerzos, acción de amasado	24
5	Acción de amasado de un compactador con llantas de hule	25
6	Onda tiempo/movimiento de vibración	29
7	Relación entre frecuencia, amplitud y asentamiento	30
8	Plancha vibradora modelo DPS 4570	37
9	Plancha vibradora modelo VPG 260	37
10	Plancha vibradora modelo VPG 160B	37
11	Detalles importantes del diseño de las planchas vibradoras	39
12	Configuraciones básicas de las planchas vibrantes	39
13	Excitador de una plancha vibradora modelo VPG 160 serie 160	42
14	Rodillo vibratorio de tambor único modelo R 900	46
15	Rodillo vibratorio de tambor doble modelo 74T y 55T	47
16	Dirección de las fuerzas centrífugas de un rodillo vibratorio modelo W 74T	50
17	Rodillo W 55 T compactando el suelo	53
18	Rodillo W 74T usado para compactar asfalto	54
19	Apisonadores	55
20	Modelos de apisonadores	56

21	Corte transversal del apisonador	56
22	Uso y tipos de apisonadores	63
23	Apisonador hidráulico y vibroapisonador	64
24	Diagrama del sitio de trabajo	89

TABLAS

I	Especificaciones BVP 11 / BVP 22	68
II	Especificaciones BW 75E	70
III	Especificaciones BW 35	72
IV	Especificaciones 65S	74
V	Especificaciones 60S / 75S	76
VI	Descripción de las máquinas	89
VII	Cuadro de resumen	92
VIII	Aplicaciones de las máquinas compactadotas	94

LISTA DE SÍMBOLOS

c	cohesión
Es	Módulo de elasticidad del suelo
F	Fuerza centrífuga
K	Constante
m	Masa del peso excéntrico
mm	Milímetros
n	Velocidad de rotación del peso excéntrico
N	Newton
N_c, N_q, N_γ	Parámetros que dependen del ángulo de resistencia al corte o fricción interna del suelo
p	Presión total de sobrecarga
p_o	Presión efectiva de sobrecarga del suelo
q	Presión aplicada sobre el cimiento
Q_U	Valor soporte último del suelo
rpm	Revoluciones por minuto
S	Asentamiento
u	Módulo de <i>Poisson</i>
V	Volumen
vpm	Vibraciones por minuto
w	Contenido de humedad
W_{op}	Contenido de humedad óptima
W_s	Peso de sólidos
W_w	Peso del agua
yd	Yardas
γ	Densidad húmeda o peso unitario

γ_d	Densidad seca o peso unitario seco
$\gamma_{m\acute{a}x.}$	Peso específico máximo
\emptyset	Ángulo de fricción interna
σ	Esfuerzo
σ_H	Esfuerzo horizontal
σ_V	Esfuerzo vertical.

GLOSARIO

Aglutinante	Son las partículas finas que llenan los huecos y sujetan firme la grava.
Agregados	Roca quebrada, arena o grava que han sido graduadas y pueden usarse como material de relleno.
Amplitud	La distancia recorrida por un cuerpo oscilante desde su eje neutro hasta el límite externo de traslación en el mismo sentido.
Densidad	La relación del peso de la sustancia a su volumen.
Cohesión	La característica de algunas partículas del suelo de atraer y adherirse a partículas semejantes. Se mantienen pegadas.
Compresibilidad	La propiedad del suelo de permanecer comprimido después de la compactación.
Excéntrica	Una masa de peso fuera de equilibrio para producir fuerza centrífuga (kg) siendo parte del excitador que produce vibración.

Excitador	El componente de un compactador vibratorio que produce fuerza centrífuga mediante una pesa excéntrica de accionamiento mecánico.
Finos	Las partículas más pequeñas del suelo en una mezcla de suelo graduada.
Frecuencia	La velocidad a la cual funciona un compactador vibratorio, generalmente indicada en VPM vibraciones por minuto.
Fuerza centrífuga	La fuerza de tiro de una pesa excéntrica puesta en movimiento giratorio, que puede cambiarse variando la velocidad del movimiento giratorio, y/o la masa de la pesa excéntrica, y/o el centro de gravedad (forma) de la pesa excéntrica.
Humedad óptima	El porcentaje de humedad al cual puede obtenerse la densidad máxima del suelo mediante compactación.
Subbase	La capa de material seleccionado que se coloca para dar resistencia a la base del camino.
Subrasante	La superficie producida nivelando la tierra nativa, o materiales baratos traídos de otra parte que sirven como base para un pavimento más costoso.

Suelo	La superficie de material suelto de la corteza terrestre.
VPM	Vibraciones por minuto, calculadas según el número de revoluciones que el excitador hace por minuto.

RESUMEN

En el presente trabajo se hará una descripción de los diferentes tipos de máquinas utilizadas en la compactación de áreas reducidas o de tamaño limitado, así como de los métodos más usuales para compactar los suelos en el campo.

Entre estos métodos se encuentran: la compactación por peso estático, compactación por amasamiento, compactación por impacto y compactación por vibración.

La compactación por peso estático es un método que se lleva a cabo por medio de presiones que se ejercen sobre el suelo, siendo más eficaz en el suelo de naturaleza granular, como arenas y gravas relativamente limpias. La compactación por amasamiento se produce cuando varias zonas de una masa de suelo, al ser sometidas a un proceso de compactación, sufren cuando menos dos ciclos de deformación aportando cada uno de ellos deformaciones en dos direcciones distintas.

La compactación por impacto constituye uno de los métodos empleados para la densificación de los suelos en el campo. Se basa en el principio de que una masa que golpea contra la superficie del suelo genera, al entrar en contacto con ella, una onda de presión que se transmite a través del suelo por medio de movimientos vibratorios.

La compactación por vibración tiene por objeto colocar al suelo en una condición de movimiento casi como la de un fluido en la cual las partículas se deslicen y acomodan adoptando una configuración más densa.

Para finalizar se presenta un ejemplo para determinar el costo de compactación utilizando dos tipos de máquinas empleadas en la compactación de áreas reducidas o limitadas.

OBJETIVOS

- **General**

Lograr que tanto estudiantes como profesionales tomen conciencia de la importancia de la compactación de suelos en el campo, ya que se requiere tener un conocimiento y control adecuado.

- **Específicos**

1. Conocer y clasificar las máquinas que existen para compactar suelos.
2. Determinar qué máquina es la apropiada para compactar un suelo dependiendo de su clasificación.
3. Dar a conocer cómo se puede calcular el costo de una compactación con diferentes máquinas.
4. Dar a conocer ciertos principios básicos para el mantenimiento y el buen funcionamiento de las máquinas.
5. Conocer cómo se calculan los tiempos en que una máquina compactaría un determinado suelo.

INTRODUCCIÓN

La compactación del suelo ha sido practicada por el hombre por miles de años. En las primeras construcciones de edificios dependieron para su estabilidad de una buena compactación. Sin embargo, hasta que la construcción de caminos no llegó a ser un arte de gran desarrollo, no se reconoció verdaderamente el valor de la compactación del suelo.

Hace algunos años, casi toda la compactación se realizaba en obras grandes de construcción, como carreteras y aeropuertos. La maquinaria que se empleaba era grande y pesada. Sólomente en las últimas décadas se ha reconocido la importancia de la compactación en áreas pequeñas. Con la introducción de apisonadores y planchas vibratorias integrales y portátiles, ha sido práctica la compactación en dichas áreas.

La compactación del suelo se especifica generalmente para los cimientos de edificios, soportes de puentes, carreteras, aceras y otras áreas de tamaño limitado, otro aspecto que hay que tomar en cuenta es el costo que representa la compactación en cualquier proyecto y por esta razón, la compactación seguirá siendo el campo más importante de aplicación de la ingeniería para cualquier tipo de construcción.

1. INFORMACIÓN GENERAL

1.1 Definiciones

1.1.1 Compactación

Se conoce como compactación al proceso de densificación de un suelo por aplicación de energía mecánica con el propósito de acercar unas a otras sus partículas sueltas, expulsando el aire y el agua que contiene. La energía aplicada es la resultante del esfuerzo de compactación del equipo empleado y la efectividad de la misma depende, principalmente, del tipo de suelo y de la forma en que se aplique el esfuerzo.

1.1.2 Curva de compactación

Si una muestra de suelo se divide en porciones y cada una de ellas se mezcla con una cantidad diferente de agua para que todas tengan distintos contenidos de humedad que varíen desde cero hasta cierto valor entre los límites líquido y plástico y luego se compactan en un recipiente, aplicándoles una misma energía de compactación, se puede obtener el peso unitario seco o densidad seca y el contenido de humedad correspondientes a cada porción después de compactada.

Si estos dos parámetros se puntan sobre un sistema de coordenadas en el cual las abscisas representan el contenido de humedad, en porcentaje, y las ordenadas el peso unitario seco, en kg./m^3 o lbs/pie^3 , se obtiene una gráfica similar a la de la figura 1.

Del análisis de esta gráfica, conocida como curva densidad seca/contenido de humedad o curva de compactación dada existe un contenido de humedad denominado óptimo, al cual el peso unitario seco es máximo.

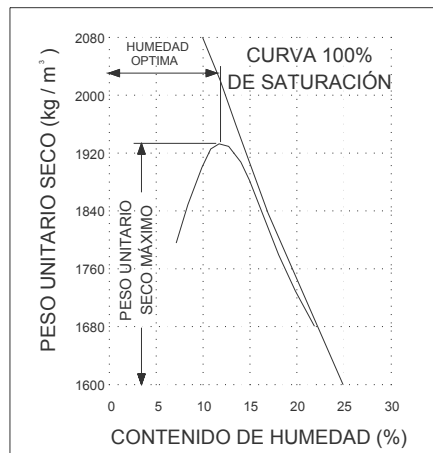
Con contenidos de humedad por debajo del óptimo, a medida que el contenido de humedad aumenta el peso unitario seco del suelo aumenta también; con contenidos de humedad por encima del óptimo, el peso unitario seco del suelo disminuye a medida que el contenido de humedad aumenta, y, si éste llega a ser muy alto, la presión del agua intersticial o presión neutral creada impide que la relación de vacíos disminuya. Por lo tanto, cualquier energía adicional de compactación que se aplique será desperdiciada.

Con un contenido de humedad dado, una compactación perfecta expulsaría todo el aire de los vacíos del suelo, produciéndose la saturación. Si en la figura 1, se puntea, sobre el eje de las ordenadas los pesos unitarios secos correspondientes a la saturación con diferentes contenidos de humedad, se obtiene la curva de 100% de saturación o de 0% de vacíos, que se localiza al lado de la curva densidad seca/contenido de humedad. Esta curva representa los pesos unitarios secos, teóricos, que obtendrían por medio de una compactación perfecta con diferentes contenidos de humedad.

Con lo expuesto anteriormente, se determina que para un contenido de humedad dado la saturación constituye el límite teórico de la compactación. La presión neutral que se genera impide que la relación de vacíos continúe disminuyendo, a menos que se produzca una reducción en el contenido de humedad. El contenido óptimo de humedad no es, en consecuencia, más que la condición de humedad en la que el suelo, para una energía de compactación dada, contiene agua en cantidad suficiente para permitir que las partículas se

deformen y acomoden en la forma más eficiente, pero no para que se produzca la saturación.

Figura 1. Curva de compactación



1.2 Conocimientos sobre la compactación del suelo

1.2.1 Efectos de compactación sobre el suelo

La compactación modifica físicamente la estructura del suelo, presentando cambios en su densidad, resistencia, valor soporte, absorción, contracción, hinchamiento y permeabilidad del mismo.

1.2.1.1 Densificación

La densificación o compactación es el efecto más importante de todos los expuestos, ya que generalmente va asociado con aumento de resistencia, valor soporte (CBR), y disminución de absorción, contracción, hinchamiento, permeabilidad y asentamientos.

A continuación se recuerdan algunos conceptos

La humedad, o contenido de humedad, es la razón del peso del agua al peso de los sólidos (w), y se expresa por la fórmula:

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

Donde:

W_w peso del agua.

W_s peso de sólidos.

Se llama humedad óptima aquella para la cual el peso unitario seco de la masa (o densidad seca) es máximo, para el método particular de compactación que se haya usado.

La densidad se define como la relación entre la masa del cuerpo y el volumen que éste posea, o sea, su masa por unidad de volumen. En compactación se utilizan dos conceptos de densidad: la densidad seca y la densidad húmeda. La densidad seca, o peso unitario seco de la masa (γ_d), es la relación entre el peso de sólidos, o suelo seco (W_s) y el volumen total (V). Es decir:

$$\gamma_d = W_s / V$$

La densidad húmeda o peso unitario de la masa (γ), es la relación entre el peso del suelo húmedo (W), y el volumen total (V). Es decir:

$$\gamma = W / V$$

Los dos conceptos van relacionados con la expresión

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + w}$$

En la que w representa el contenido de humedad en decimales. Desde épocas remotas se sabía de cierta relación entre el contenido de humedad y la facilidad o dificultad de compactación de un suelo. No fue sino hasta el descubrimiento de R.R. *Proctor* (en el año de 1933) de la relación densidad seca versus contenido de humedad de compactación, para una misma energía de compactación, en que se tuvo una visión más clara de la interrelación.

Es decir, si se aplica una energía de compactación dada a un suelo, a un contenido de humedad de compactación bajo se obtendrá una densidad seca baja. Si se aumenta el contenido de humedad de compactación y se vuelve a aplicar la misma energía de compactación, se obtendrá una densidad seca mayor, y así sucesivamente hasta alcanzar una densidad seca máxima. Al contenido de humedad de compactación al haberse alcanzado la densidad seca máxima se denomina contenido óptimo (para esa energía de compactación dada). Si se sigue incrementando el contenido de humedad de compactación se empezarán a obtener densidades secas menores, si se vuelve a repetir el ensayo con una energía de compactación mayor, se obtendrá una densidad seca máxima mayor, entonces, el contenido de humedad óptimo disminuirá.

Diferentes tipos de suelos tienen diferentes características de compactación.

En los suelos cohesivos la densificación ocurre principalmente por distorsión y reorientación de partículas. A modo que se aumenta el contenido de humedad la cohesión disminuye y el esfuerzo de compactación es más efectivo.

En suelos no cohesivos la reorientación de granos, arreglo y rotura de partículas en los puntos de contacto son los factores principales que logra la compactación pues decrece la tensión superficial y se lubrican las partículas.

Sin embargo, tanto para suelos cohesivos como no cohesivos, si se les agrega agua cada vez más, llega un punto en que se tiende a la saturación y los esfuerzos de compactación se pierden en ocasionar presiones en el poro de agua sin lograr mayor densificación.

En los suelos no cohesivos hay influencia de la granulometría. Si se tiene un sólo tamaño de partículas es mucho más difícil lograr una buena compactación, que si se tienen partículas de varios tamaños. En los suelos cohesivos hay influencia del agua.

1.2.1.2 Absorción e hinchamiento

Estos efectos van relacionados con el contenido de humedad que posea el suelo, así también, la capacidad de cambios de volumen que tenga. Los suelos cohesivos de partículas muy pequeñas, cuando secos, absorben mucha mayor agua al saturarse, y se reflejan hinchamientos o incrementos de volumen. Por el contrario, los suelos no cohesivos secos, al saturarse, generalmente muestran menor absorción de agua y un cambio despreciable o ninguno en el volumen con el cambio de contenido de humedad al saturarse.

Entre la compactación y el contenido de humedad del suelo, existe una relación definida por los ensayos de *Proctor* (estándar AASHTO T-99 y modificado AASTO T-180). Los ensayos dan curvas de contenido de humedad versus densidad seca.

Hay que tener cuidado al utilizar estos ensayos, ya que con un mismo suelo se obtienen humedades óptimas y densidades secas diferentes. Dentro de los suelos arcillosos, existen unos más susceptibles a hinchamiento que otros.

Para materiales susceptibles a hinchamiento la forma de compactación también tiene influencia sobre el hinchamiento y contracción.

1.2.1.3 Permeabilidad

La permeabilidad de un suelo expresa la facilidad con que el agua atraviesa el suelo, bajo la acción de la gravedad o por la aplicación de otras fuerzas. La permeabilidad de un suelo compactado depende de.

- Relación de vacíos, porosidad y densidad.
- Estructura.
- Forma, tamaño de partículas y graduación.
- Viscosidad del líquido.
- Grado de saturación.

Con la compactación se reduce la relación de los vacíos, la porosidad y aumenta la densidad, por lo que disminuye la permeabilidad. La estructura es la que más afecta la permeabilidad de un suelo. Durante la compactación a mayor contenido de agua mayor distorsión, obteniéndose de esta manera

menor permeabilidad. Con la compactación se logra una reorientación de partículas, lo que hace una estructura más homogénea, reduciendo así la permeabilidad. La estratificación también juega un papel importante. La permeabilidad paralela a estratos puede ser de 2 a 30 veces la permeabilidad perpendicular a estratos en formaciones sedimentarias.

La forma, tamaño de los granos y su graduación, son también importantes, especialmente en suelos gruesos. Con la compactación se hace que las partículas pequeñas llenen los espacios entre los granos gruesos del suelo, logrando una menor permeabilidad.

El efecto de permeabilidad es muy importante cuando se trabaja en presas, pues si lo que se pretende es evitar la fuga de agua si un suelo es permeable, esto no se logrará. Por lo que se necesita que el suelo sea impermeable.

1.2.1.4 Resistencia a cargas y deformaciones

Los factores que influyen en la resistencia de los suelos, y se relacionan con la compactación de suelos son: el ángulo de fricción interna (ϕ) y la cohesión (c).

El valor soporte permisible de un suelo de fundación es la presión que el suelo es capaz de soportar, sin que ocurra falla por corte ni asentamientos excesivos, y con un factor de seguridad (en un rango entre 2 y 3). El valor soporte último dividido por un factor de seguridad, da el máximo valor soporte permisible a usar sin riesgo.

Para falla por corte el valor soporte total último está expresado por relaciones, como la de Terzaghi o similares. Para cimientos cuadrados Terzaghi presenta la siguiente fórmula:

$$Q_u = 1.3 c N_c + p_o (N_q - 1) + 0.4 \gamma B N_\gamma + p$$

Donde:

- c Cohesión, en ton/m^2
- P_o Presión efectiva de sobrecarga del suelo a nivel de la fundación, en ton/m^2
- γ Densidad del suelo bajo el nivel de la fundación, en ton/m^3
- B Ancho lateral mínimo de la base, en m
- p Presión total de sobrecarga, en ton/m^2

Los parámetros N_c , N_q y N_γ dependen del ángulo de resistencia al corte o fricción interna del suelo, con lo que también se incrementan los parámetros N_c , N_q y N_γ ; por lo que también se aumenta el valor soporte último.

Los asentamientos de cimientos están expresados por relaciones como la siguiente:

$$S = \frac{qB (1 - u^2) l_w}{E_s}$$

Donde:

- S Asentamiento, en m
- q Presión aplicada sobre el cimiento, ton/m^2
- u Módulo de *Poisson*, adimensional
- l_w Factor de forma (depende de la forma del cimiento), adimensional
- E_s Módulo de elasticidad del suelo, en ton/m^2

De la expresión anterior, sólo los parámetros (u) y (E_s) dependen del suelo. El módulo de *Poisson* (u) , no es muy influyente sobre el valor de asentamiento. En cambio, el valor del módulo de elasticidad, (E_s) , sí lo es. Existe una gran variación en el valor de E_s de un mismo suelo, dependiendo de su densidad y firmeza, que a la vez depende del grado de compactación. Es decir, que la compactación tiene influencia muy importante sobre los asentamientos posteriores de rellenos, cimientos, zapatas, etc.

2. INFLUENCIA DE LA COMPACTACIÓN SOBRE EL SUELO

2.1 Influencia de la compactación sobre las propiedades del suelo

En sus términos más simples, la compactación es una forma de estabilizar los suelos, es decir, una operación que tiene por objeto modificar las propiedades de éstos para adecuarlos al empleo en un caso particular. Como se ha mencionado, la compactación de un suelo es indispensable para la ejecución de obras tales como

- Embalses de agua en depósitos, canales, presas, etc.
- Construcción de carreteras, calles y pistas de aterrizaje.
- Cimentaciones para edificios, estribos de puentes, etc.

Estos tres tipos específicos de estructuras tienen propósitos distintos; por lo tanto, las propiedades de ingeniería del suelo consideradas como importantes para cada uno de ellos son también distintas.

En términos de sus propiedades de ingeniería, las razones principales para compactar los suelos, y cuyo orden de importancia varía según el caso, son las siguientes

2.1.1 Reducción en la compresibilidad

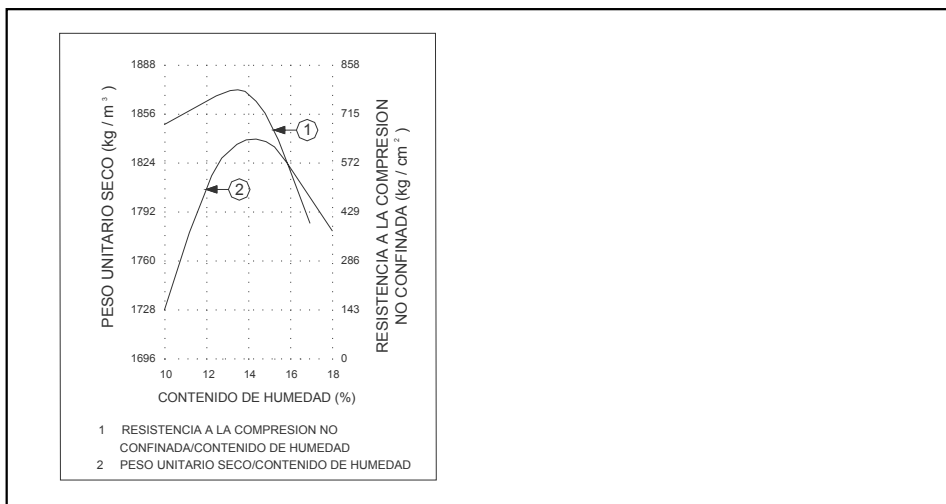
La mayoría de los suelos en su estado natural, así como la mayoría de los rellenos sueltos, experimentan cambios significativos de volumen cuando se les somete a la acción de cargas de intensidad incrementada.

La compactación viene, en estos casos, a constituir un mecanismo para prevenir los asentamientos potenciales de una estructura -antes de su construcción, como en el caso de edificios o carreteras, o durante ella como en el caso de las presas de tierra- debido a que la energía aplicada comprime el suelo hasta un grado tal que expulsa la mayor parte del aire que contiene, evitando cambios ulteriores de volumen con la aplicación de las cargas.

2.1.2 Aumento en la resistencia

Probablemente, la razón más importante para compactar un suelo, es decir, aumentar su peso unitario, es el mejoramiento de su resistencia. El hecho de que la compactación mejora significativamente dicha resistencia se pone de manifiesto en la figura 2, que muestra la relación entre el esfuerzo de compresión no confinada y la curva densidad/humedad, para una arcilla arenosa. La curva muestra que el esfuerzo máximo en compresión no confinada ocurre a un contenido de humedad un poco menor que el óptimo.

Figura 2. Relación entre la resistencia, el contenido de humedad y el peso unitario seco de una arcilla arenosa.



2.1.3 Disminución de la permeabilidad

La compactación, al disminuir el volumen de vacíos de un suelo, no hace más que dificultar el flujo de agua a través del mismo; por lo tanto, reduce su permeabilidad. Cuando el suelo va a funcionar como un sello como en el caso del núcleo central de arcilla de una presa de tierra, la permeabilidad es la propiedad que se debe controlar para evitar el deterioro de la estructura; el control se logra por medio de una supervisión muy estricta de los trabajos de compactación.

El conocimiento de los efectos de la compactación sobre las propiedades de los suelos ha conducido a una mejor comprensión de las ventajas de su empleo, ya que no existe otro sistema de tratamiento por cuya aplicación, dichas propiedades puedan modificarse tanto a un costo relativamente bajo.

2.2 Compactación del suelo

Se conoce como compactación al proceso de densificación de un suelo -por aplicación de energía mecánica- con el propósito de acercar unas a otras sus partículas sueltas, expulsando el aire y el agua que contiene. La energía aplicada es la resultante del esfuerzo de compactación del equipo empleado y la efectividad de la misma depende, principalmente, del tipo de suelo y de la forma en que se aplique el esfuerzo. En los suelos no cohesivos la compactación se obtiene, en su mayor parte, por el acomodamiento de los granos, aunque algunas veces la fractura de éstos en los puntos de contacto contribuye también. En los suelos de este tipo, el acomodamiento es adversado por el rozamiento entre sus partículas; la presión de contacto, y por lo tanto la

fricción, aumentan debido a la tensión capilar del agua atrapada entre los granos.

Cualquier aumento en el contenido de humedad en el suelo hará que la tensión capilar disminuya, incrementándose la efectividad del esfuerzo de compactación.

En los suelos cohesivos, la compactación se produce como consecuencia, tanto de la distorsión como del acomodamiento de las partículas, condiciones a las cuales se opone la cohesión. En estos suelos, las variaciones en el contenido de humedad tienen efectos muy sensibles sobre la efectividad de la compactación.

¿Por qué es necesaria la compactación del suelo?

Casi toda estructura que hace el hombre es finalmente soportada por suelos de uno u otro tipo. Durante la construcción de una estructura, generalmente el suelo es movido de su posición natural mediante operaciones de excavación, nivelación o zanjeo. Siempre que esto se haga, el aire penetra en la masa del suelo y el suelo aumenta de volumen. Antes de que este suelo pueda soportar una estructura sobre el suelo mismo o a un lado, los espacios vacíos deben eliminarse a fin de obtener una masa sólida de un suelo de gran resistencia.

En la construcción de viviendas o edificios comerciales es provechosa la compactación del suelo. En resumen, la compactación debe realizarse cada vez que se mueva y trastorne el suelo. Buena compactación significa un suelo bien compactado, sin vacíos y la certeza de la aplicación de las condiciones bajo las cuales se realizó el diseño.

2.2.1 Fundamentos de la compactación

Los fundamentos de la compactación no están perfectamente explicados, sin embargo, se reconoce que el agua juega un papel importante, especialmente en suelos finos.

Es así como existe un contenido de humedad óptima (W_{op}) para suelos finos, para el cual el proceso de compactación dará un peso máximo de suelo por unidad de volumen, es decir, un peso específico seco máximo (γ_{max} o DMCS).

Para bajos contenidos de humedad, el agua está en forma capilar produciendo compresiones entre las partículas constituyentes del suelo, lo cual tiende a la formación de grumos difícilmente desintegrables que dificultan la compactación.

El aumento del contenido de humedad hace disminuir esta tensión capilar en el agua, haciendo que una misma energía de compactación produzca mejores resultados. Si el agua es tal que se tienen parte importante de los vacíos llenos de agua, dificulta el desplazamiento de las partículas de suelo produciendo una disminución en la eficiencia de la compactación. Por esta razón se habla de una humedad óptima para suelos finos, para el cual el proceso de compactación dará un peso máximo de suelo por unidad de volumen (DMCS).

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, la energía de compactación suministrada al suelo por unidad de volumen.

La secuencia práctica para definir las características del proceso que resultará en una compactación óptima, es la siguiente: cuando se va a realizar una obra en la que el suelo vaya a ser compactado, se obtienen muestras de suelo que se van a emplear, sometiéndolas en laboratorio a distintas condiciones de compactación hasta encontrar alguna que garantice un proyecto seguro y que a la vez pueda lograrse económicamente, con la maquinaria existente. En terreno se producen las condiciones de laboratorio adoptadas para el proyecto y, finalmente una vez iniciada la construcción se verifica la compactación lograda en terreno con muestras elegidas al azar para comprobar si se están satisfaciendo los requerimientos del proyecto.

En resumen, el propósito de un ensayo de compactación de laboratorio, es determinar la correcta cantidad de agua de amasado a usar cuando se compacte el suelo en terreno, y el grado de compacidad que puede esperarse al compactarse el suelo en este grado de humedad óptimo. Para cumplir este propósito, un ensayo de laboratorio debe considerar una compactación comparable a la obtenida por el método que se utilizará en terreno.

2.2.2 Beneficios de la compactación

- a. Aumenta la capacidad para soportar carga: los vacíos producen debilidad del suelo e incapacidad para soportar cargas pesadas. Estando apretadas todas las partículas, el suelo puede soportar cargas

mayores, debido a que de esta manera las partículas mismas soportan mejor.

- b. Impide el hundimiento 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 más profundo en un lado o en una esquina, por lo que se producen grietas o un derrumbe total.
- c. Reduce el escurrimiento del agua: un suelo compactado reduce la penetración de agua. El agua fluye 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 sería el esponjamiento del suelo durante la estación de lluvias y la contracción del mismo durante la estación seca.
- e. Impide los daños de las heladas: el agua se expande y aumenta el volumen al congelarse. Esta acción a menudo causa que el pavimento se hinche, y a la vez, las paredes y losas del piso se agrieten. La compactación reduce estas cavidades de agua en el suelo.

2.2.3 Factores que influyen en la compactación

Los factores que afectan la compactación de los suelos en el campo son prácticamente los mismos que influyen sobre la compactación en el laboratorio, o sea, el contenido de humedad, la energía de compactación y el tipo de suelo. En la forma de aplicación de la energía de compactación estriba la diferencia

principal entre ambos tipos de compactación, como consecuencia del equipo empleado para aplicarla. En el campo, la energía de compactación es aplicada por una máquina de compactar, o compactador, y su cantidad depende del número de pasadas, es decir, del número de viajes de ida o regreso del compactador y del espesor de la capa de suelo que se ha de compactar.

En este caso, el problema principal consiste en determinar si una unidad específica de equipo es capaz de densificar el suelo hasta el grado deseado y, si éste se alcanza, bajo qué condiciones de espesor de capa, número de pasadas y contenido de humedad. Estos tres parámetros constituyen lo que se conoce como características de compactación de campo y tipifican a cada tipo particular de máquina de compactar. Otro factor de importancia para la compactación en el campo lo constituye el rendimiento del equipo, que se expresa en términos de volúmenes de suelo compactados en un período determinado de tiempo. El rendimiento de una máquina es una función de los factores siguientes:

- Ancho de la faja a compactar.
- Espesor de la capa a compactar.
- Contenido de humedad del suelo a compactar.
- Velocidad de viaje de la máquina.
- Número de pasadas necesarias para alcanzar el peso unitario deseado, en función de los factores antes mencionados.
- Maniobrabilidad de la máquina.
- Habilidad de la máquina para trabajar en las pendientes de los rellenos o cerca de ellas.
- Adaptabilidad de la máquina a la compactación de una amplia gama de tipos de suelos, bajo condiciones variadas.

La composición de un suelo que varía desde la grava casi pura hasta la arcilla casi pura, pasando por distintas mezclas de grava y arcilla determina el método de compactación a emplear y, en consecuencia, el equipo indicado para compactarlo adecuadamente. Los métodos más usuales como se verá posteriormente para compactar los suelos en el campo son los siguientes

- Compactación por peso estático
- Compactación por amasamiento
- Compactación por impacto
- Compactación por vibración

3. MÉTODOS Y MÁQUINAS PARA COMPACTACIÓN

3.1 Métodos de compactación

A continuación se presentan cuatro de los métodos más utilizados en la práctica de la compactación, estos son.

3.1.1 Compactación por peso estático

Este método se lleva a cabo por medio de presiones que se ejercen sobre el suelo, habiendo en la actualidad varios equipos que trabajan de esta manera. El tipo de suelo en que son más eficaces son los de naturaleza granular como arenas y gravas relativamente limpias.

Una característica de este método de compactación es que se produce de arriba hacia abajo, es decir, desde la superficie del material hasta la capa compactada anteriormente.

Los compactadores de peso estático, presentan un efecto triturador en el suelo, debido al peso estático, los compactadores de este tipo son rodillos de superficie con rodillos lisos de acero o con llantas neumáticas, se ha notado que cuando sólo se utilizan rodillos lisos en arcillas y limos plásticos, se presentan grietas al cabo de cierto número de pasadas en la parte superior del material que se está compactando, conociéndose en el campo como laminaciones.

Entre los rodillos se pueden mencionar los rodillos en tándem que son aquellos que tengan dos o tres rodillos en fila. Los rodillos son, en realidad, tambores de acero que pueden llenarse con lastre para aumentar su peso.

Si una apisonadora se denomina de 14-20 toneladas, significa que el peso muerto mínimo de la máquina es de 14 toneladas y que los rodillos pueden llenarse con lastre, de material tal como agua o arena mojada, hasta alcanzar un peso total máximo de 20 toneladas. Conviene tener presente que los pesos totales de las compactadoras estáticas tándem pueden ser mayores que las compactadoras estáticas de tres rodillos, sin embargo, su presión unitaria suele ser inferior debido a que la mayor superficie de contacto de los rodillos hará que la carga se reparta en una mayor extensión de suelo.

Las compactadoras estáticas de tres rodillos tienen dos traseros y uno delantero de guía. Los estrechos rodillos traseros, así como el ancho rodillo delantero, pueden llevar lastre. Dichas unidades suelen dejar profundas huellas en suelos granulares debido a la concentración de la carga en los rodillos.

Ambos tipos tienen una velocidad de marcha bastante baja y su seguridad de operación es dudosa en trabajos realizados sobre pendientes elevadas. Las compactadoras de tipo *tándem* o de tres rodillos, son generalmente eficaces en suelos de naturaleza más granular, en los que el efecto triturador de su peso estático se emplea mejor; sin embargo, las arenas sueltas posiblemente no puedan soportar las unidades de este tipo.

El esfuerzo de compactación de un rodillo estático puede verse reducido en materiales de carácter granular-plástico o plástico-granular. Esto se debe, a que los rodillos pesados producen una trituración en la parte superior de la capa, incluso en espesores de poca profundidad. En materiales plásticos, los rodillos estáticos tienden a producir un efecto de puente lo que quiere decir que

el rodillo pone presión en las partículas del suelo pero no reajusta dichas partículas para llenar los vacíos.

Los rodillos estáticos tienen también un efecto de arado que crea ondas plásticas delante de los rodillos y da lugar al resurgimiento del material tras su paso. Las compactadoras tándem se utilizan con efectividad para nivelar los puntos altos dejados por rodillos de pata de cabra, vibratorios o de llantas neumáticas. Sin embargo, este tipo de compactación tiene una tracción limitada.

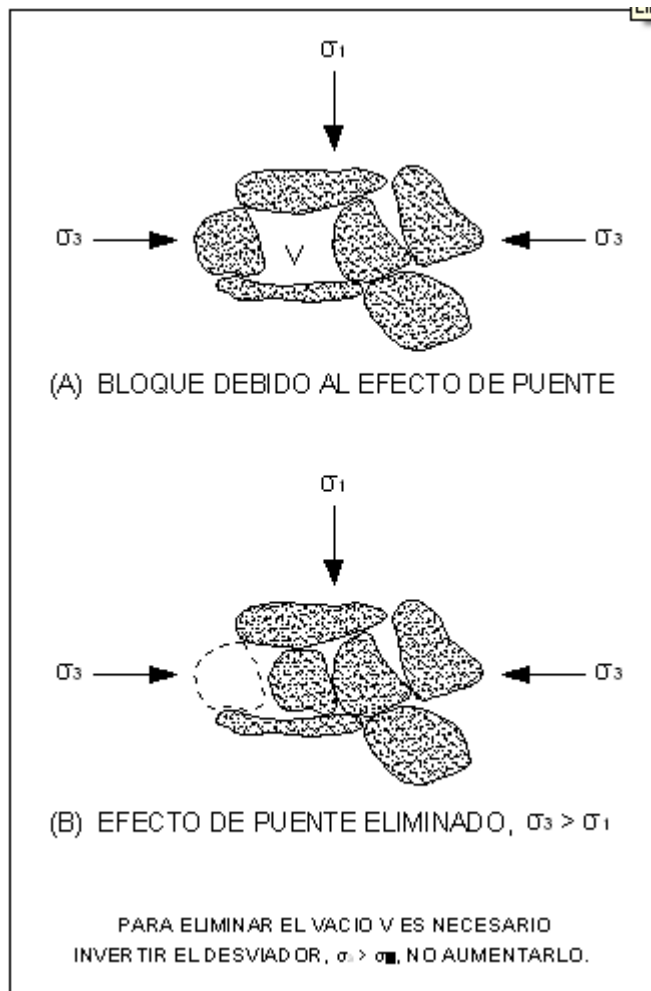
3.1.2 Compactación por amasamiento

La acción ejercida por cierto tipo de máquinas para compactar, compactadores tales como los rodillos de *sheep foot* y los compactadores de llantas de hule, proporciona una idea del significado del término amasado, con el cual deben estar familiarizados los técnicos que tienen a su cargo trabajos de compactación. No es fácil definir exactamente el amasado, por lo que para propósitos del presente trabajo, bastará decir que se produce cuando varias zonas de una masa de suelo, al ser sometidas a un proceso de compactación, sufren cuando menos dos ciclos de deformación, aportando cada uno de ellos deformaciones en dos direcciones distintas.

Es concebible que las partículas de un suelo se encuentren dispuestas en una forma similar a la que se muestra en la figura 3. En este tipo de disposición, las partículas se bloquean unas con otras por el efecto de puente y ningún incremento en el esfuerzo vertical como el que se aplica durante una compactación de laboratorio puramente estática, como es el caso del ensayo de California, la hará variar. Sin embargo si se ejerce una presión σ_3 mayor que σ_1 , el vacío V si podría eliminarse, ver figura 3. De lo expuesto anteriormente,

se puede concluir que una compactación que produce amasado debido a la aplicación de esfuerzos en dos direcciones como mínimo es más efectiva que otra puramente estática que aplique únicamente esfuerzos verticales.

Figura 3. Efecto de puente



Como consecuencia de las aplicaciones sucesivas de carga en una zona y luego en otra vecina, todo compactador ejerce cierta acción de amasado que no es necesariamente despreciable. Cuando se coloca un compactador en un emplazamiento A como se muestra en la figura 4, éste induce sobre un punto M, situado sobre la vertical de A, un desviador de esfuerzos, $\sigma_1 - \sigma_3$, en el cual el esfuerzo principal mayor σ_1 es vertical, y el esfuerzo principal menor σ_3 es horizontal. Al ser σ_1 mayor que σ_3 se produce una deformación que da lugar a desplazamientos en aquellos planos que forman con el horizontal un ángulo de $45^\circ + \phi/2$.

Si luego el compactador se traslada a un segundo emplazamiento, A', vecino a A, existe aún un desviador en el punto M. En efecto, el esfuerzo vertical σ_v , equivale al peso de una columna de suelo cuya sección es igual a la unidad de superficie. El esfuerzo horizontal σ_h . Es evidentemente igual a σ_3 en el punto M 'situado sobre la vertical de A' y por lo tanto el desviador se invierte, produciéndose así una acción de compactación acompañada de deslizamientos sobre los planos cuya inclinación con respecto al horizontal sea de $45^\circ - \phi/2$.

Si el compactador se aplica una segunda vez sobre A, se reproducirá el efecto mostrado en la figura 4, iniciándose así un nuevo ciclo que producirá un nuevo amasamiento, esto se debe a las pasadas sucesivas, sobre un mismo punto de las superficie de contacto del compactador con el terreno a compactar.

A esta primera acción de amasado, ciertos tipos de compactadores adjuntan otras como

- Los puntos situados entre dos huellas de llantas de hule están sometidos a la acción de desviadores invertidos, lo que da como resultado una acción de amasamiento, como se muestra en la figura 5.
- La acción amasadora de un rodillo *sheep foot* se reforzará por el hecho de que las patas aplastan los salientes que se forman en los espacios entre las huellas que dejan las patas que les preceden.
- La vibración puede no adaptarse a la definición dada para el amasamiento, pero a menudo presenta efectos análogos. Al suprimir, aunque sea por pocos instantes, los esfuerzos verticales, o al reducirlos considerablemente, la vibración invierte al desviador de esfuerzos destruyendo las disposiciones del tipo de la indicada en la figura 4.

Además, al atenuar o suprimir las fricciones, la vibración permite el destrabamiento de ciertos engranes como el que muestra dicha figura.

Figura 4. Inversión del desviador de esfuerzos, acción de amasado.

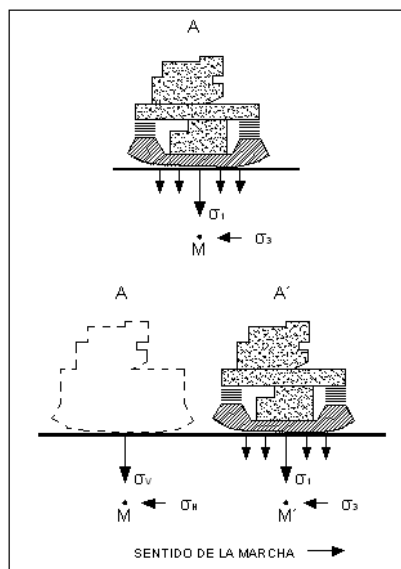
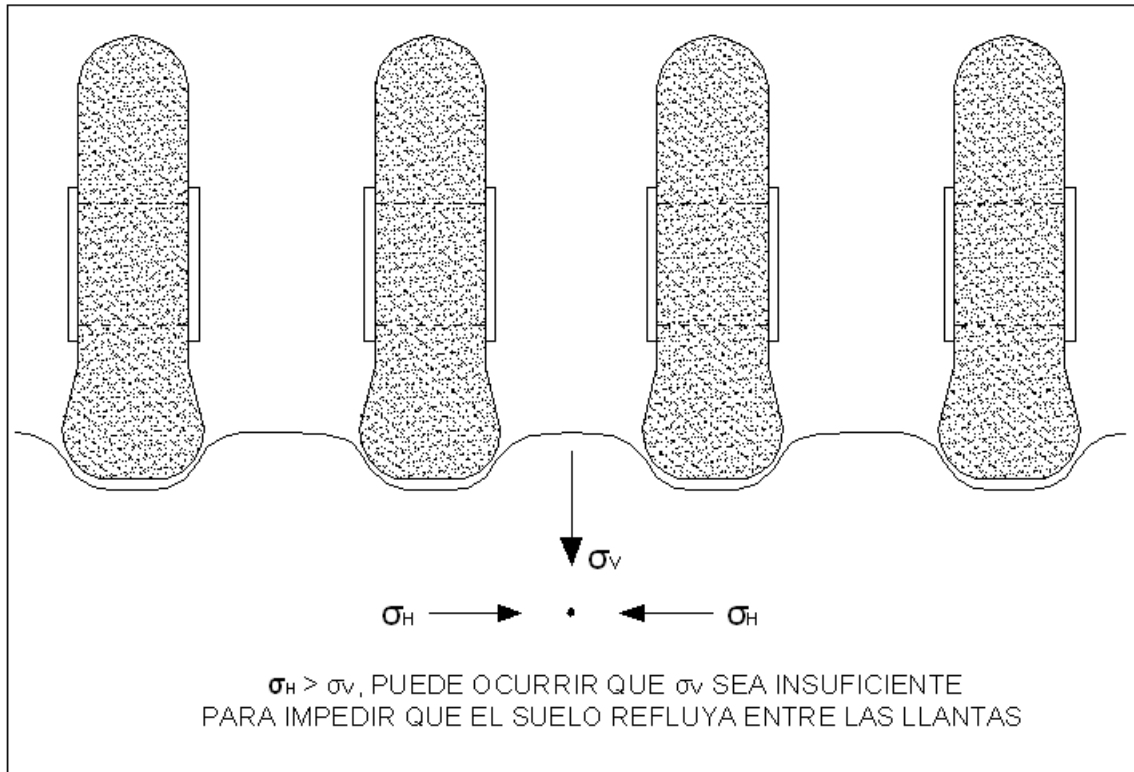


Figura 5. Acción de amasado de un compactador con llantas de hule



3.1.3 Compactación por impacto

La compactación por impacto constituye uno de los métodos originalmente empleados para la densificación de los suelos en el campo. Se basa en el principio de que una masa que golpea contra la superficie del suelo genera, al entrar en contacto con ella, una onda de presión que se transmite a través del suelo induciendo en sus partículas cierto movimiento vibratorio. Esta vibración, sin embargo, es mínima dada la baja frecuencia de los golpes aplicados, de 50 a 500 por minuto, aproximadamente y su gran amplitud, razón por la cual no se le toma en cuenta cuando se analiza la compactación por impacto.

En comparación con la compactación por presión estática, es evidente que la presión generada por el impacto es mayor que la que generaría el peso de una masa equivalente que se encontrara simplemente apoyada sobre la superficie del suelo.

En su forma primitiva la compactación por impacto se obtenía por medio de herramientas manuales; hoy en día se obtiene, además, por aplicación de herramientas neumáticas, hidráulicas y de combustión interna, o por la caída libre, desde una altura regulable, de masas de gran peso.

Este último sistema hace posible el control de la energía cinética aplicada y permite la compactación, más o menos eficiente, de una amplia gama de tipos de suelos a distintos contenidos de humedad.

El grado de compactación alcanzado por impacto es una función de la energía cinética por unidad de área de la base del compactador y de las características de deformación del suelo bajo la acción de cargas dinámicas, pero depende, también, de la relación entre la frecuencia de la limitada vibración inducida por el impacto y la frecuencia natural del suelo que se trata de compactar. Si la primera equivale a menos de la mitad de la segunda el asentamiento debido a la fuerza pulsativa será mínimo; a medida que la diferencia entre ambos valores se reduce, el asentamiento aumenta y la porosidad del suelo disminuye; si ambas frecuencias llegaran a ser iguales el asentamiento sería, teóricamente, de 20 a 40 veces mayor que el que se alcanzaría aplicando una carga estática equivalente a la fuerza pulsativa.

Además de los factores de orden general: tipo de suelo, contenido de humedad, hay otros que influyen significativamente sobre los resultados de la compactación por impacto; entre estos últimos cabe mencionar los siguientes:

- a. Energía de compactación aplicada por unidad de área de la base del compactador.
- b. Altura de caída o velocidad de impacto (energía cinética).
- c. Forma y dimensiones del elemento activo.

El primero de estos factores es, según los estudios de *Lewis*, el que podría determinar las características de diseño de compactadores por impacto, del tipo aplicable a los trabajos corrientes, con capas a compactar entre los 15 y los 20 cms. Para que un compactador por impacto sea adaptable a la compactación de cualquier tipo de suelo, debe estar provisto de un dispositivo que permita ajustar la energía por golpe a los requerimientos del tipo de suelo a compactar.

3.1.4 Compactación por vibración

La compactación de un suelo por vibración tiene por objeto colocarlo en una condición de movimiento, casi como la de un fluido, en la cual las partículas se deslicen y acomodan adoptando una configuración más densa. Al compactarlo por este método, un suelo es sometido a dos clases de cargas:

- a. Una carga vertical, impuesta por una masa que se desplaza sobre su superficie.
- b. Una carga dinámica, inducida por una sucesión rápida de impactos, aplicados también a su superficie.

La energía total aplicada equivale, por lo tanto, a la suma del peso estático de operación del compactador -total o parcial- transmitido al suelo por la plancha o el tambor según sea el caso, y la fuerza pulsativa desarrollada por el mecanismo vibrante; el valor de esta última es igual al de la fuerza centrífuga generada por la rotación de uno o más pesos excéntricos alojados dentro del cuerpo del compactador, definida por la expresión:

$$F = 4\pi^2 n^2 r m$$

Donde:

- F Fuerza centrífuga.
- n Velocidad de rotación del peso excéntrico (CPS).
- r Excentricidad, o sea la distancia entre el eje de rotación y el centro de gravedad del peso m.
- m Masa del peso excéntrico.

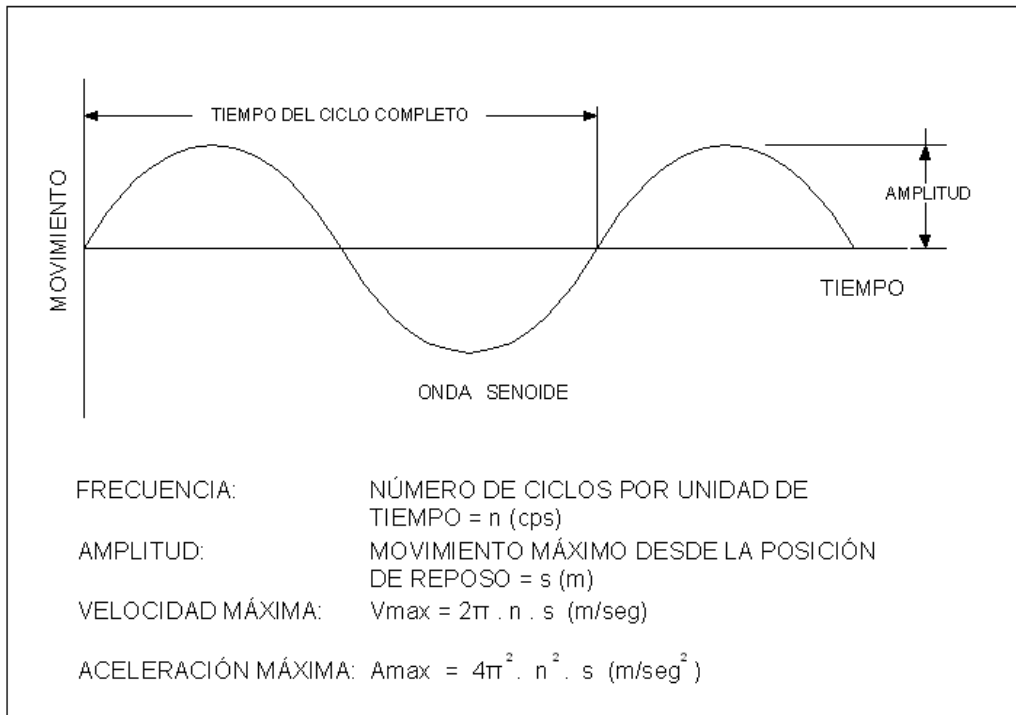
Cuando el peso excéntrico actúa hacia abajo, la fuerza centrífuga, F, que actúa radialmente y hacia afuera del eje de rotación, se suma al peso estático del compactador; por el contrario, cuando el peso excéntrico actúa hacia arriba la fuerza centrífuga tiende a contrarrestar el peso estático y a levantar el compactador, separándolo de la superficie del suelo. Si se analiza la expresión anterior, se notará que la fuerza centrífuga puede ser modificada variando la velocidad de rotación del peso excéntrico, la excentricidad o la masa del peso excéntrico. En los compactadores vibrantes, la magnitud de la fuerza centrífuga se predetermina variando únicamente la velocidad de rotación del peso excéntrico.

La velocidad de rotación del peso excéntrico, n, se conoce como frecuencia del compactador y describe la frecuencia de las oscilaciones que

dan origen a la vibración, ver figura 6. Al rotar el peso excéntrico y producirse la fuerza centrífuga, el compactador se eleva desde su posición de equilibrio en contacto con el suelo hasta una cierta altura. La distancia vertical máxima a la que el tambor o la plancha se eleva, se denomina amplitud de las vibraciones del compactador; esta amplitud depende de la elasticidad y de las propiedades de apisonado del suelo y es una función de la fuerza centrífuga y del peso del compactador.

A una frecuencia determinada la amplitud alcanza su máximo; esta frecuencia es aproximadamente igual a la frecuencia natural del compactador y de la porción vibrante del suelo soporte.

Figura 6. Onda tiempo/movimiento de vibración



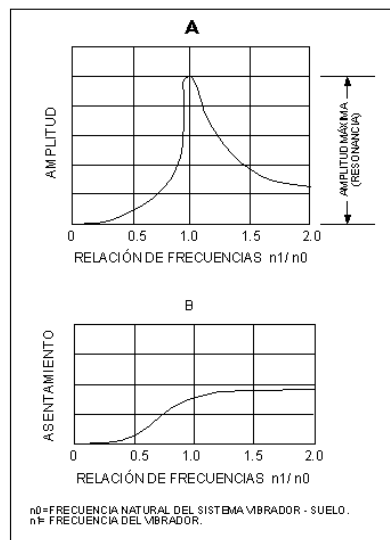
El término “frecuencia natural” corresponde a la frecuencia de las vibraciones que se originan en un cuerpo, con límites bien definidos e inducidas

por un impulso aislado. Si el impulso es periódico, la amplitud de las vibraciones forzadas resultantes aumenta cuando el impulso se aproxima a la frecuencia natural del cuerpo; a una frecuencia próxima a la frecuencia natural, la amplitud es un máximo, produciéndose en ese instante el estado conocido como resonancia, ver figura 7-A.

La frecuencia a la cual se produce la resonancia depende no sólo de las propiedades del suelo, sino del peso y de las dimensiones del compactador. Si un mismo equipo se utiliza en suelos diferentes, la frecuencia de resonancia aumenta cuando aumenta la densidad del suelo.

Si la frecuencia del impulso se incrementa gradualmente, el asentamiento del compactador aumenta, ver figura 7-B. Este asentamiento aumenta con mayor rapidez a medida que la frecuencia se aproxima a la frecuencia natural, hasta que llega a ser mucho mayor que el asentamiento que produciría una carga estática equivalente a la fuerza pulsativa. Como se puede observar en la figura 7-B, el aumento del asentamiento es mayor dentro de los valores comprendidos entre 0.5 y 1.5 veces el valor de la frecuencia natural.

Figura 7. Relación entre frecuencia, amplitud y asentamiento



Algunos investigadores coinciden en afirmar que la densidad máxima de un suelo se alcanza, cuando se le compacta por vibración, a la frecuencia de resonancia; otros, por parte, han comprobado que la densidad de un suelo compactado por vibración aumenta al aumentar la frecuencia, sin importar que las frecuencias aplicadas sean mayores que la frecuencia de resonancia.

La frecuencia y la amplitud de las vibraciones de un compactador determinan su campo de aplicación más adecuado. Si se trata de compactar suelos altamente plásticos, por ejemplo, es necesario aplicarles una vibración de gran amplitud y de baja frecuencia; por el contrario, para compactar materiales granulares se requiere el empleo de una frecuencia alta y de una baja amplitud.

Los compactadores vibrantes operan aplicando al suelo una sucesión rápida de impactos, generado por la rotación del sistema excéntrico. Cada impacto produce en el suelo ondas de esfuerzos, longitudinales y transversales, cuya intensidad disminuye a medida que se alejan del compactador; estas ondas son las que producen la compactación del suelo, la que depende, por lo tanto, del tipo y de la intensidad de las ondas generadas por el compactador. El número de impactos por unidad de longitud, que el compactador aplica, depende tanto de la frecuencia de vibración como de la velocidad de viaje, así:

$$\text{Impactos por metro} = \frac{\text{Frecuencia (CPS)}}{\text{Velocidad m/s}}$$

En resumen: se ha comprobado que la compactación por vibración es muy efectiva, aun cuando los factores que involucra no son todos bien conocidos por el momento. La experiencia ha demostrado, sin embargo, que

además de los mencionados anteriormente las siguientes características del compactador inciden definitivamente sobre los resultados obtenidos.

- **Peso:** este lo mantiene apoyado contra el suelo y su influencia sobre el efecto de compactación es muy importante, puesto que tanto la energía cinética como el momentum, ya sea del tambor o de la plancha son directamente proporcionales al peso cuando la amplitud y la frecuencia son constantes. Si el compactador es muy liviano, la energía generada por el sistema excéntrico se disipará hacia arriba; si el compactador es muy pesado la amplitud se reducirá considerablemente. La profundidad máxima a compactar es, en definitiva, una función del peso del compactador.
- **Construcción del tambor o de la plancha:** en ambos casos la cubierta deberá ser lo suficientemente rígida para no deformarse bajo la acción de la carga; si la cubierta se deformara, la deformación absorbería una cantidad apreciable de energía.
- **Velocidad de viaje:** como ya se apuntó, influye decisivamente sobre el número de impactos aplicados por unidad de longitud del recorrido.

3.2 Tipos de máquinas y su selección

Los métodos de compactación en el campo, descritos anteriormente, se han ido desarrollando al mismo ritmo que la mecanización de las obras, porque la aplicación de la energía necesaria exige el empleo de una máquina cuya potencia y maniobrabilidad se adapten a cada caso en particular. Existe hoy en día en el mercado una gran variedad de máquinas para compactar, cada una

de las cuales tiene acciones y aplicaciones específicas, lo que permite seleccionar la más adecuada a cada tipo de trabajo.

La selección de una máquina dependerá tanto del tipo de suelo a compactar como de la acción que ésta le aplique. Como ya se mencionó, los suelos de tipo cohesivo responden mejor a la presión y al impacto, mientras que los suelos granulares responden mejor a una acción de vibración. A la luz de lo anterior, las máquinas de compactar se pueden clasificar de acuerdo con la forma en que transmiten su energía al suelo, habiéndose propuesto varios sistemas más o menos completos. Para los fines de este trabajo se ha adoptado, por su simplicidad, la clasificación propuesta por el Ingeniero J. *Dewander Leer*, del Centro de Investigación en Carreteras, de Bruselas, Bélgica, quien las agrupa en tres grandes grupos, siendo estos:

Grupo 1 Máquinas que actúan por presión y amasado
(compactadores estáticos).

Grupo 2 Máquinas que actúan por vibración
(compactadores vibrantes).

Grupo 3 Máquinas que actúan por impacto (apisonadores).

Las máquinas en el primer grupo trabajan por aplicación de una presión estática elevada que, debido a la fricción interna del suelo, tiene un efecto de compactación limitado.

Las comprendidas en el segundo grupo, trabajan aplicando una sucesión rápida de impactos contra la superficie del suelo, propagando hacia abajo

ondas que provocan en las partículas movimientos oscilatorios que eliminan la fricción interna y facilitan su acomodo. Las que integran el tercer grupo, actúan según el principio de que un cuerpo, al chocar contra una superficie, genera una onda de presión cuya eficacia en profundidad es significativamente mayor que la de una presión estática y que comunica a las partículas una energía oscilatoria que, a su vez, provoca el movimiento de éstas.

Cada uno de los grupos comprende tipos diferentes de máquinas, los que se describirán someramente; más adelante se describirán, con más detalle, los que son de aplicación en áreas reducidas o confinadas.

- **Grupo 1** Compactadores por presión y amasado (estáticos)

El efecto de los compactadores comprendidos dentro de este grupo se debe a la aplicación de una carga estática, derivada de su peso muerto únicamente, por medio de uno o varios rodillos o por medio de llantas de hule. Dentro de este grupo de máquinas se distinguen los tipos siguientes:

- a. Compactadores de rodillo liso.
- b. Compactadores de rodillo *sheep foot*.
- c. Compactadores de llantas de hule.
- d. Compactadores de rejilla.

El primer tipo no es de aplicación a la compactación en áreas reducidas o confinadas, con la única excepción de la variante conocida como compactador de ensanches, el que se describirá posteriormente. Los otros tres tipos tampoco son de aplicación a dichos casos, por lo que únicamente se mencionan, sin entrar en detalles.

- **Grupo 2** Compactadores vibrantes

En este grupo están comprendidos todos aquellos compactadores que, además de aplicar una carga estática, aplican una acción de vibración producto de la rotación de masas excéntricas que giran alrededor de un eje. Los tipos que integran el grupo son los siguientes:

- a. Rodillos lisos vibrantes
- b. Rodillos vibrantes *sheep foot*
- c. Planchas vibrantes

Los rodillos lisos vibrantes se emplean, primordialmente, para el trabajo en áreas abiertas: carreteras, rellenos. Las versiones de dimensiones reducidas, sin embargo, se emplean mucho en la compactación de áreas confinadas; por ser las únicas de interés para el presente trabajo se describirán, con más detalle, más adelante.

Los rodillos vibrantes *sheep foot* no se fabrican de dimensiones adecuadas a la compactación en áreas reducidas, por lo que se mencionan a manera de ilustración solamente.

Las planchas vibrantes tuvieron un éxito relativo en la compactación de grandes áreas, empleadas en batería y acopladas a un bastidor de camión, pero su empleo ha sido ya descartado por lo poco práctico de esta configuración. Individualmente son muy eficaces y por lo tanto de mucha aplicación a la compactación en áreas confinadas o reducidas; por esta razón se describirán detalladamente más adelante.

Grupo 3 Compactadores por impacto

Bajo este nombre genérico se agrupan todos los compactadores que actúan por aplicación de una sucesión, más o menos rápida, de impactos contra el material que se trata de compactar. El principio en que se basan es el primero que se aplicó, ya que el apisonador manual no es, en síntesis, sino una masa que se deja caer sobre la superficie a compactar. Los tipos básicos son:

- a. Apisonadores
- b. Masa de caída libre

Se puede incluir, además, las planchas vibrantes como un tercer tipo dentro de este grupo, pero si bien es cierto que éstas aplican al suelo una serie de impactos sucesivos y rápidos, su característica principal la constituye el efecto de vibración que inducen en el material. Por esta razón se podría considerar a las planchas como compactadores activos por impacto y vibración.

De los dos tipos que constituyen este grupo, únicamente los apisonadores tienen aplicación en áreas reducidas y se detallarán más adelante. Las masas de caída libre no son de aplicación práctica a esta condición, puesto que requieren de equipo adicional como grúas o excavadoras de dimensiones considerables y de un espacio de maniobra relativamente amplio.

En el mercado se encuentran gran variedad de máquinas utilizadas en la compactación de suelos, pero la mayoría de éstas lo constituyen equipos pesados que son utilizados en áreas de compactación extensas; además existe un grupo pequeño de máquinas livianas que se utilizan para compactar áreas reducidas, las cuales son objeto del presente trabajo, pudiéndose mencionar entre estas:

3.2.1 Planchas vibrantes

Las planchas vibrantes aplican vibraciones de alta frecuencia y amplitud baja sobre el suelo y se usan principalmente para compactar suelos granulares como arena y grava; mezclas de suelos granulares y cohesivos; también en mezclas asfálticas, tanto calientes como frías. Ver figuras 8, 9 y 10.

Figura 8. Plancha vibradora modelo DPS 4570



Figura 9. Plancha vibradora modelo VPG 260



Figura 10. Plancha vibradora modelo VPG 160B



Fuente: Máquinas para compactación del suelo página 20

3.2.1.1 Clasificación y descripción

El elemento activo consiste en una placa metálica que se apoya en el suelo a compactar, está provista de un motor a gasolina, Diesel o eléctrico, pudiéndose utilizar estas últimas en lugares donde hay que reducir el ruido y el humo. El motor acciona un peso excéntrico que al girar comunica a la placa un movimiento sinusoidal; la componente vertical de este movimiento pone el suelo en vibración, en tanto que su componente horizontal permite el desplazamiento de la máquina.

La mayoría de las planchas vibrantes son del tipo conocido como de sistema vibrador de dos masas, en el cual la masa inferior está constituida por la placa de base, los amortiguadores y el excitador que va firmemente unido a ella; la masa superior está integrada por el motor, sus controles y la correa en V. El sistema de transmisión, cuya función consiste en transmitir la energía del motor al peso excéntrico del excitador, puede estar constituido por un eje de acero, por una cadena, por una unión universal o por una faja en V. El sistema

de amortiguación de la vibración, entre el motor y la plancha, está integrado por resortes en espiral o por amortiguadores de hule. El maneral o barra de guía, también aislado contra la vibración, permite al operador conducir la máquina sin mayor esfuerzo, ver figura 11.

Se distinguen dos tipos de planchas vibrantes, de acuerdo con la posición del motor y del excitador, dentro del conjunto, siendo estos:

- a. Planchas vibrantes con el motor y el excitador colocados en el centro.
- b. Planchas vibrantes con el excitador colocado al frente y el motor en la parte posterior, ver figura 12.

Figura 11. Detalles importantes del diseño de las planchas vibratoras.

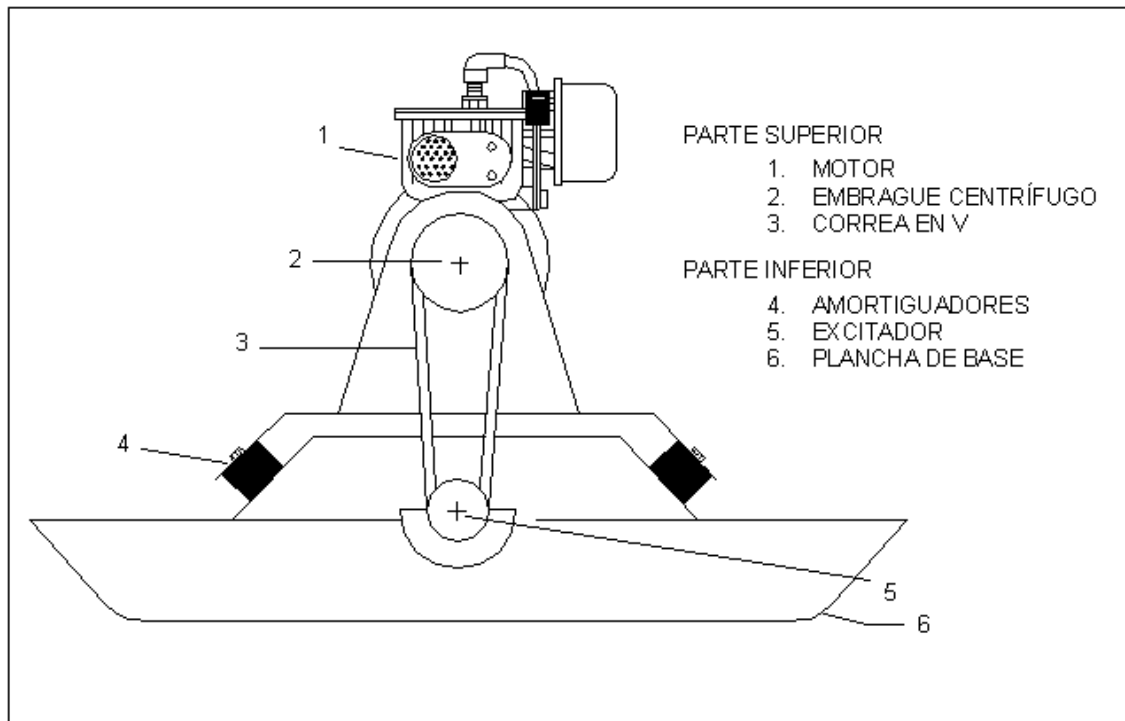
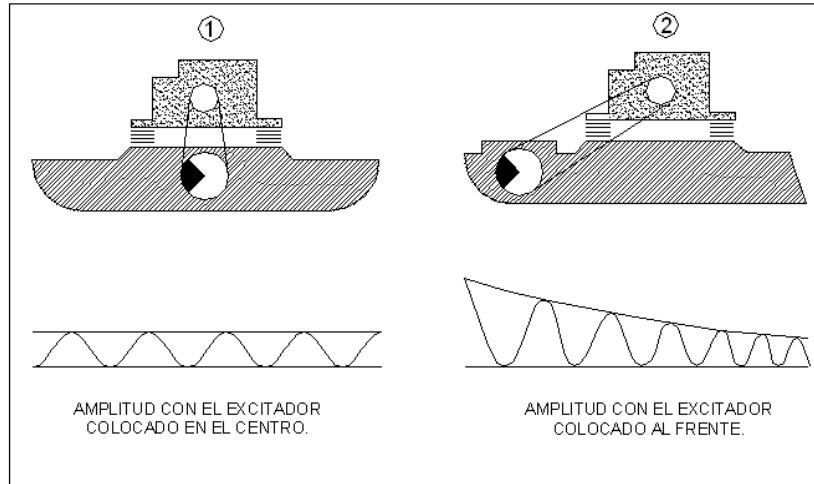


Figura 12. Configuraciones básicas de las planchas vibrantes



En las planchas del primer tipo, la disposición del conjunto motor-excitador permite que la amplitud de vibración de la placa sea uniforme, condición que determina un aprovechamiento total de la misma para fines de compactación. En las del segundo tipo, la disposición del conjunto motor-excitador, en contraste con la de las del primer tipo, permite una amplitud de vibración en el frente de la plancha mayor que la amplitud en la parte posterior; en consecuencia, su velocidad de desplazamiento es mayor.

Además de los dos tipos descritos se ha desarrollado planchas vibrantes con un sistema de dos excitadores colocados simétricamente en el centro de la plancha; ambos excitadores son de igual masa y engranados en tal forma que siempre giran en sentidos opuestos. Esta disposición permite que la máquina se pueda desplazar indistintamente hacia adelante o hacia atrás con sólo accionar una palanca situada en la barra de guía y cuyo efecto es el de cambiar la posición de uno de los pesos excéntricos, desfasándolo en 180° en relación al otro. El cambio de dirección es instantáneo, aún cuando la plancha se esté desplazando a toda velocidad; todos los ejes del sistema giran en un sentido específico, que no cambia al cambiar la dirección de marcha.

Un tipo especial de plancha vibrante es el que se puede montar en una retroexcavadora, en lugar del cucharón; esta variante consta de un par de excitadores que giran en sentidos opuestos, accionados por un motor hidráulico alimentado por el circuito de la excavadora. El desplazamiento de la placa se obtiene con el movimiento del brazo de la máquina.

1.2.1.2 Eficacia y campo de aplicación

Las planchas vibrantes son muy eficaces para la compactación de áreas reducidas, tales como banquetas, zanjas, zapatas, etc. El ancho de compactación se puede ampliar añadiendo a ambos lados de la placa original placas extensoras, o acoplado paralelamente dos o más planchas, con lo cual se dispone de una poderosa máquina de compactar.

Las planchas con bajas frecuencias de vibración, de 1,500 a 3,000 RPM son apropiadas para la compactación de gravas y arenas gruesas, mientras que las planchas cuya frecuencia de vibración es alta, 3,000 a 6,000 RPM son las indicadas para compactar arenas finas. Las planchas del tipo que lleva el excitador al frente son, como consecuencia de la mayor amplitud, muy adecuadas a la compactación de mezclas de suelos con cierto contenido de arcilla.

La acción en profundidad de las planchas vibrantes en general es excelente; en ciertos casos y bajo determinadas condiciones llega a ser mayor que la de los rodillos vibrantes.

3.2.1.2.1 Factores de diseño importantes de las planchas vibratoras

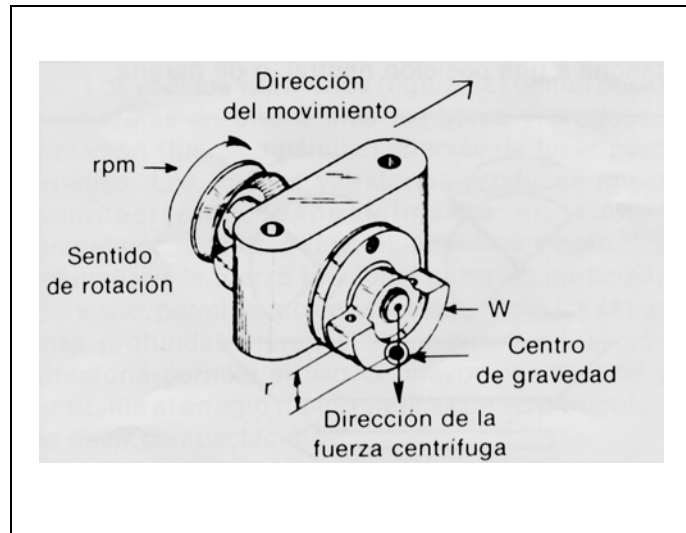
El peso estático total, el diseño del excitador, la frecuencia del mismo y la colocación del motor/excitador desempeñan un papel importante en la eficiencia y funcionamiento de la plancha vibradora.

- **Peso estático:** el peso estático de una plancha vibradora pequeña (clase de 68 – 136 kg) por lo general es insignificante en comparación con la fuerza centrífuga que el excitador genera. Aquí, la fuerza vibratoria es la fuerza dominante que surte efecto en las partículas del suelo durante la compactación.

En las planchas vibratorias más grandes (de más de 136 kg) la acción de vibración junto con el peso estático producen efecto en las partículas del suelo. El efecto total consiste en vibrar y apretar entre sí las partículas del suelo para lograr la compactación.

- **Diseño del excitador:** el excitador de cualquier plancha vibradora puede considerarse como el corazón de la máquina, ver figura 13. El excitador funciona siguiendo el plan de hacer girar un peso excéntrico desequilibrado a alta velocidad para producir fuerza centrífuga, siendo ésta la encargada de hacer que la máquina vibre, se mueva hacia delante y compacte el suelo.

Figura 13. Excitador de una plancha vibradora modelo VPG 160 serie 160



Fuente: Máquinas para compactación del suelo página 21

La fórmula que representa la fuerza centrífuga producida por un excitador es la siguiente

$$W * r * \text{rpm}^2 * K$$

Donde:

- W Peso de la excéntrica.
- r Radio desde el centro del eje al centro de gravedad de la pieza excéntrica.
- rpm² Cuadrado de la velocidad del excitador.
- K Factor constante.

El hecho de que la fuerza centrífuga producida varía con el cuadrado de la velocidad del excitador es de importancia práctica en la operación de una plancha vibradora por dos razones.

- Si se aumenta un poquito la velocidad del motor, la fuerza centrífuga aumenta considerablemente, lo cual sobrecarga los cojinetes del excitador.
- Si la velocidad del motor se disminuye un poquito, la fuerza centrífuga disminuiría demasiado, dando lugar a poco rendimiento, baja velocidad de avance y poco esfuerzo de compactación.

Por consiguiente, es de suma importancia que el motor de cualquier plancha vibradora sea ajustado con un tacómetro para la velocidad recomendada por el fabricante.

3.2.1.3 Ventajas y desventajas

En comparación con los rodillos vibrantes, las planchas vibrantes compactan mejor la superficie debido a que el área de contacto con el suelo es mayor; tienen, sin embargo, el inconveniente de ser más lentas y menos maniobrables. Además, su empleo hace necesario un número menor de pasadas; su efecto en profundidad puede superar al de un rodillo vibrante y por lo tanto, el costo por unidad de volumen compactado puede ser más bajo.

3.2.2 Rodillos vibrantes

Los rodillos vibrantes son compactadores cuya característica distintiva la constituye un sistema de pesos excéntricos instalado dentro del tambor, o los tambores según el caso, lo que les permite aplicar al suelo, además de una acción estática, una acción de vibración que al anular la fricción entre las partículas las reorienta y acomoda.

Los rodillos vibratorios producen mejor compactación, especialmente en suelos granulares, debido a que los impulsos vibratorios neutralizan la fuerza friccional entre las partículas del suelo, permitiendo de esta manera que las capas más profundas vibren y se asienten.

3.2.2.1 Clasificación y descripción

De acuerdo con las normas establecidas por la Asociación de Fabricantes para la Industria de la Construcción, CIMA, organización integrada por la mayoría de los fabricantes de equipo para construcción, tanto de los Estados Unidos de América como del resto del mundo, los rodillos vibrantes se clasifican como:

- a. Rodillos de tambor único, con asiento para el operador.
- b. Rodillos de doble tambor, con asiento para el operador.
- c. Rodillos de tambor único, con el operador detrás.
- d. Rodillos de doble tambor, con el operador detrás.
- e. Rodillos de tambor único, remolcados.

Para el presente trabajo solamente son de interés las configuraciones 3 y 4, por ser las únicas aplicables a la compactación en áreas reducidas o confinadas. Por esta razón, sólo éstas se describen a continuación.

Los rodillos vibrantes de tambor único, con el operador detrás, son máquinas livianas cuyo elemento activo es un cilindro -tambor- que a la vez que se desplaza sobre el suelo a compactar le imprime una vibración inducida por un mecanismo excitador, localizado en su interior y que le transmite un movimiento oscilatorio. En algunos modelos la dirección se obtiene haciendo resbalar el tambor, lo que obliga al operador a realizar un esfuerzo mayor; en

otros, ésta se consigue por medio de una rueda directriz posterior de llanta sólida o provista de neumático.

Básicamente, la estructura de estos rodillos consiste en un bastidor, fabricado en plancha de acero estructural o en hierro fundido, a cuya parte inferior va acoplado el tambor, por intermedio del grupo amortiguador que evita que la vibración se transmita a las demás componentes de la máquina y asegura que la casi totalidad del esfuerzo vibratorio se aproveche en el suelo.

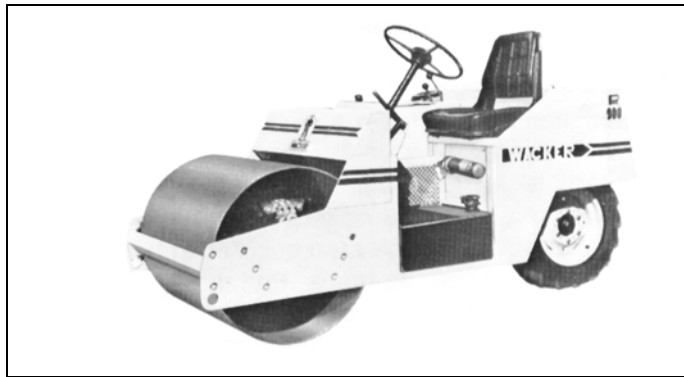
En la parte superior del bastidor va montado el motor, que acciona el tambor por medio de un sistema lateral de transmisión que, al igual que el sistema de vibración, puede ser hidráulico o mecánico. La transmisión hidráulica es más ventajosa que la mecánica ya que reduce el número de piezas movibles y permite una variación infinita de velocidades en ambos sentidos, con transición gradual de uno a otro, sin cambios bruscos y sin alterar la vibración; facilita, además, la operación en pendientes, contribuye a la facilidad de frenado y provee un aislamiento más efectivo de la vibración.

Tanto la velocidad como el sentido de desplazamiento y su inversión son controlados por medio de una válvula de bloqueo que controla el flujo y la dirección del aceite hacia el motor hidráulico.

En la mayoría de los modelos el sistema de transmisión del motor al tambor está cubierta por una tapa que sobresale del bastidor, que no permite la operación junto a paredes o bordillos y obliga, por lo tanto, a dejar una franja estrecha sin compactar que es necesario compactar a mano posteriormente. En otros, la transmisión está alojada dentro del bastidor, ambos lados están libres de protuberancias y la unidad puede desplazarse a ras de las obstrucciones, eliminando el inconveniente anterior.

La dirección se efectúa por medio de un maneral de mango largo y altura ajustable, para un mayor efecto de palanca y facilidad de dirección localizándose en el extremo un manubrio que incorpora todos los controles, tanto del motor como del sistema de vibración.

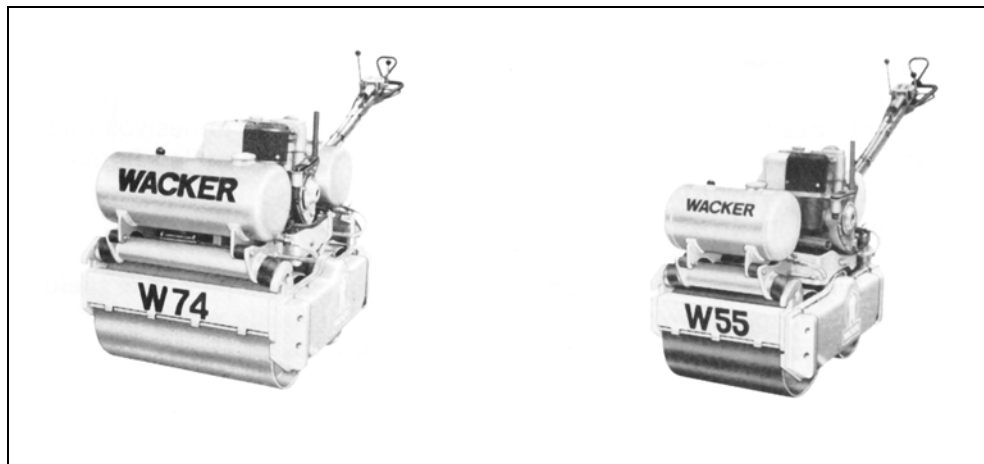
Figura 14. Rodillo vibratorio de tambor único modelo R 900



Fuente: Máquinas para compactación del suelo página 23

Como se mencionó anteriormente, para la compactación del suelo en áreas de tamaño limitado, los rodillos vibratorios de tambor doble son los principales en su clase, ver figura 15.

Figura 15. Rodillo vibratorio de tambor doble modelos 74T y 55T



Fuente: Máquinas para compactación del suelo página 24

El principio básico de operación de los rodillos de doble tambor con el operador detrás, así como sus características de construcción y funcionamiento son prácticamente los mismos de los rodillos de tambor único. El bastidor, sin embargo, es más robusto y fabricado por lo general en hierro fundido; el grupo motriz va montado sobre éste con conectores flexibles para eliminar la vibración.

En los modelos de bastidor rígido el operador controla la dirección haciendo que el compactador resbale, lo que requiere un gran esfuerzo físico. Para eliminar esta condición algunos fabricantes han incorporado a sus modelos una rueda directriz posterior de una reducida porción de la carga, suficiente para facilitar la dirección pero conservándolo en contacto con el suelo en tal forma que sea operacional cuando el sistema de vibración está funcionando. En algunos de los modelos más recientes, el motor, la bomba y la transmisión de vibración van montados en una unidad independiente del bastidor colocada por lo general encima de éste, aislada contra golpes y vibraciones y totalmente desmontable para facilidad de mantenimiento.

En rodillos como el modelo W74T, ambos tambores vibran. Mientras un tambor se encuentra en su movimiento ascendente, el otro está moviéndose hacia abajo y golpeando el suelo, como se ve en las fases A y C de la figura 16. Esto quiere decir que siempre hay un tambor en contacto con el suelo y que la fuerza de impacto es siempre descendente. Las fuerzas horizontales en cada tambor (fases B y D) son iguales y en sentido opuesto, por lo tanto, se cancelan entre sí.

Debido a que no existe una fuerza horizontal, el movimiento de avance de la máquina tiene que mantenerse mediante una transmisión de engranajes

directa que acciona ambos tambores en sus movimientos de avance y retroceso.

Al seleccionar un rodillo vibratorio de tambor doble que el operador empuja desde atrás para la compactación del suelo en áreas de superficie limitada, deben considerarse las especificaciones y parámetros siguientes

- El ancho del tambor que se adapte a la aplicación.
- El peso estático que facilite el manejo y el transporte.
- La fuerza centrífuga producida para la compactación de suelos profundos.
- La presión dinámica lineal que es la presión de la fuerza G por cm. del tambor.

$$\text{Presión dinámica lineal} = \frac{\text{Fuerza centrífuga}}{\text{Número de tambores} * \text{ancho de tambor}}$$

Para el rodillo modelo W 74T, la presión dinámica lineal es:

$$\frac{4,086 \text{ kg.}}{2 \times 75 \text{ cm}} = 27.24 \text{ kg/cm}$$

- La presión estática lineal que es la presión estática por cm. del ancho del tambor.

$$\text{Presión estática lineal} = \frac{\text{Peso estático}}{\text{Número de tambores} * \text{ancho de tambor}}$$

Para el rodillo modelo W 74T, la presión estática lineal es:

$$\frac{845 \text{ kg.}}{2 \times 75 \text{ cm}} = 5.63 \text{ kg/cm}$$

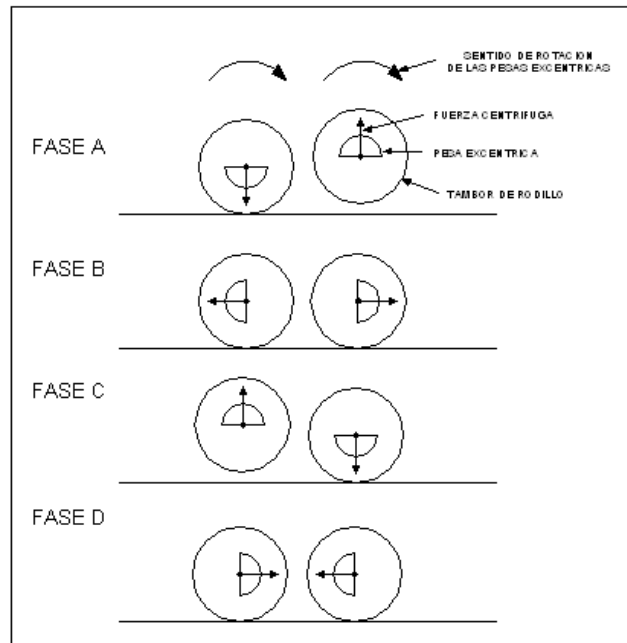
Usando como ejemplo el rodillo modelo W 74T, la presión dinámica lineal resulta ser cinco veces mayor que la presión estática lineal. Por esta razón, con un rodillo vibratorio pequeño se puede efectuar mayor compactación que con un rodillo estático de un tamaño cinco veces mayor.

Tratando siempre de facilitar la dirección, ciertos fabricantes han desarrollado bastidores articulados y tambores gemelos, con sistemas hidráulicos independientes para el control de la velocidad. En el primer caso el paralelismo de los rodillos se modifica por medio de un sistema hidráulico de dirección, con lo que se da a la máquina un ángulo de viraje. En el segundo, la dirección se controla bloqueando la rotación de los tambores del lado opuesto por medio de palancas que accionan las válvulas de control tal como se hace en las máquinas de oruga. Este procedimiento elimina la necesidad de contar con un maneral de dirección, lo que hace posible la maniobra aún en espacios realmente reducidos.

En los rodillos de este último tipo, el bastidor consta de un elemento vertical colocado en medio de los rodillos y que soporta una plancha horizontal sobre la cual van montados el motor y el mecanismo vibrador.

Esta configuración tiene la ventaja de que los rodillos sobresalen del bastidor, lo que permite la compactación de las áreas adyacentes a las paredes laterales de zanjas u otras obstrucciones.

Figura 16. Dirección de las fuerzas centrífugas de un rodillo vibratorio modelo W 74T



Las nervaduras incorporadas a los tambores de ciertos modelos aumentan la tracción y facilitan la operación en planos inclinados.

Como en los rodillos de doble tambor ambos tambores son vibrantes, el rendimiento potencial se duplica, lo que reduce el número de pasadas requerido, pero el hecho de que los dos tambores vibren es de interés únicamente cuando las vibraciones emitidas por ellos se combinan y armonizan.

En la mayoría de los rodillos de este tipo los tambores vibran sincronizadamente por la acción de excitadores que son pesos excéntricos que giran en el mismo sentido pero desfasados en 180°. En esta forma se logra que siempre haya un tambor en contacto con el suelo y que el efecto alterno de impacto sea siempre dirigido hacia abajo.

Las fuerzas generadas en cada uno de los tambores son iguales en magnitud pero de sentidos opuestos y por lo tanto se anulan; es por esta ausencia de fuerzas horizontales que el desplazamiento de la máquina se debe efectuar por medio de un sistema de propulsión. Bajo estas condiciones, la velocidad de avance no está sometida a oscilaciones, el equilibrio del compactador es mejor y su capacidad de ascenso aumenta, siendo, como promedio, de 35° con el sistema de vibración funcionando y de 50° sin vibración; la velocidad máxima promedio es de 5 km/h.

3.2.2.2 Eficacia y campo de aplicación

Los rodillos vibrantes se utilizan, principalmente, en la compactación de suelos granulares poco o no cohesivos; de ahí que una de sus mayores aplicaciones sea a la construcción de bases de pavimentos. Las experiencias de campo han demostrado que sobre todo cuando se emplean rodillos pequeños o medianos de doble tambor es posible compactar rellenos de suelos granulares con piedra, en capas de 0.50 m, con dos a tres pasadas, a una velocidad promedio de 4 km/h. A pesar de que estos rodillos pueden compactar rellenos de piedra, en capas de mayor espesor que cuando compactan arena y grava, su eficiencia máxima se obtiene cuando el diámetro de las piedras no sea mayor que la mitad del espesor de la capa.

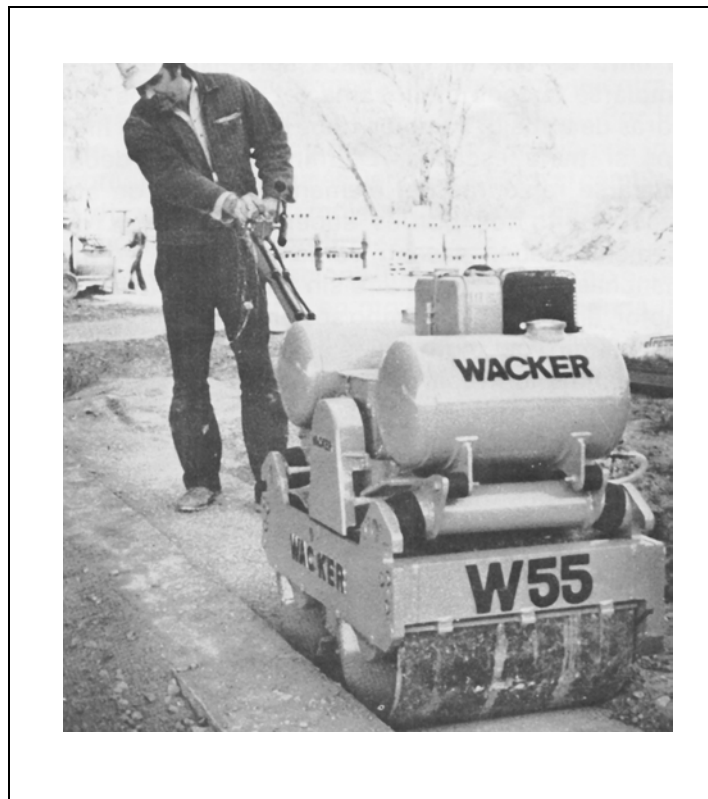
En la compactación de suelos arenosos, los rodillos livianos son muy eficientes cuando el espesor de la capa es del orden de los 0.20 a los 0.40 m; si el suelo es de granulometría uniforme, los rodillos vibrantes autopropulsados no desarrollan la tracción suficiente, por lo que no resultan muy eficientes en este caso. Las arenas limosas, las gravas limosas, las arenas arcillosas y las gravas arcillosas pueden compactarse con rodillos lisos vibrantes, pero el espesor de la capa debe ser reducido; en la compactación de suelos arcillosos,

únicamente son de aplicación los rodillos vibrantes *sheep foot* y no se fabrican rodillos livianos de este tipo.

En términos generales, el campo de aplicación de los rodillos vibrantes se circunscribe a los casos siguientes:

- a. Cuando el área a compactar es relativamente grande, puesto que el ancho y la velocidad de compactación son mayores que los de los otros equipos.
- b. Cuando la superficie a compactar es inclinada y no es posible utilizar planchas vibrantes.
- c. Cuando se trata de compactar zanjas o excavaciones alrededor de cimientos, en las que el rodillo no necesita de equipo adicional que lo levante para entrar o salir.
- d. Cuando el terreno es áspero y con desniveles, ya que la tracción positiva del rodillo hace que se desplace con más facilidad.

Figura 17. Rodillo W 55 T compactando el suelo.



Fuente: Máquinas para compactación del suelo página 25

3.2.2.3 Ventajas y desventajas

Los rodillos vibrantes, como los mencionados, son por lo general máquinas livianas, lo que facilita su traslado de un lugar a otro. Su eficiencia en profundidad es apreciable sobre todo si su velocidad de viaje no es muy alta y el número de pasadas que se requiere es reducido, por lo que con ellos se puede compactar capas de mayor espesor a menor costo; el uso de una velocidad demasiado alta durante la compactación se traduce en la necesidad de aumentar el número de pasadas.

Tienen el inconveniente de no producir una buena compactación superficial y si no se les emplea adecuadamente pueden dar lugar a ondulaciones indeseables en la superficie. Además, si se aumenta el número de pasadas se corre el riesgo de sobre compactar la superficie haciéndola aparecer floja y triturada.

Entre los rodillos no vibrantes cabe destacar por ser el único de aplicación a la compactación en áreas confinadas, el llamado compactador de ensanches, que se utiliza para compactar zanjas poco profundas pero de gran longitud o para ampliaciones laterales de calzadas o carreteras. En este compactador el tren de propulsión está constituido por una combinación de llantas de hule que ruedan sobre la superficie de la calzada o sobre una de las paredes de la zanja; su elemento activo lo constituye un rodillo liso, angosto y de gran diámetro que compacta el fondo de la zanja o de la banda de ensanche.

Figura 18. Rodillo W 74T usado para compactar asfalto.



Fuente: Máquinas para compactación del suelo página 25

3.2.3 Apisonadores

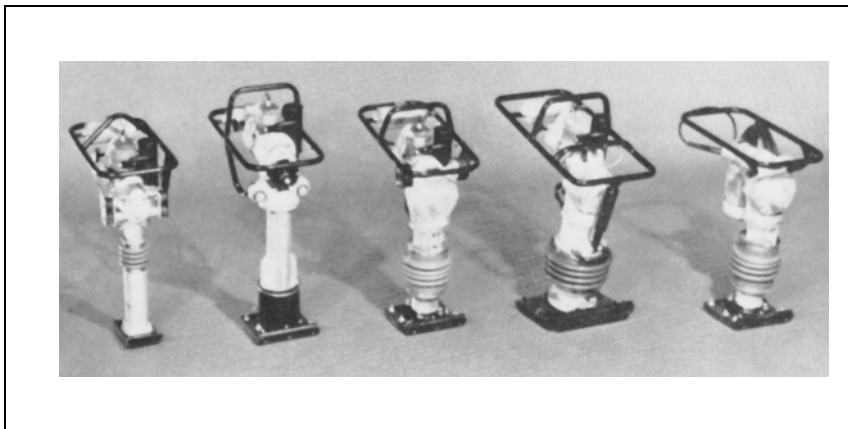
Los apisonadores son compactadores que actúan por impacto y están constituidos por una masa que se proyecta hacia arriba y hacia abajo, golpeando la superficie del suelo, impulsada por la mano del hombre o por la expansión de un fluido dentro de una cámara.

Los apisonadores producen una fuerza de impacto que es necesaria para la compactación de suelos cohesivos, ver figuras 19.

Los apisonadores están clasificados como apisonadores de impacto vibratorio. Esto se debe al alto número de golpes que dan por minuto, de 500 a 800. A esta velocidad, se induce vibración en el suelo. Debido a su acción vibratoria, combinada con el impacto, los apisonadores de impacto vibratorio también pueden emplearse en suelos granulares y mixtos. En la figura 20 se presentan dos modelos de apisonadores.

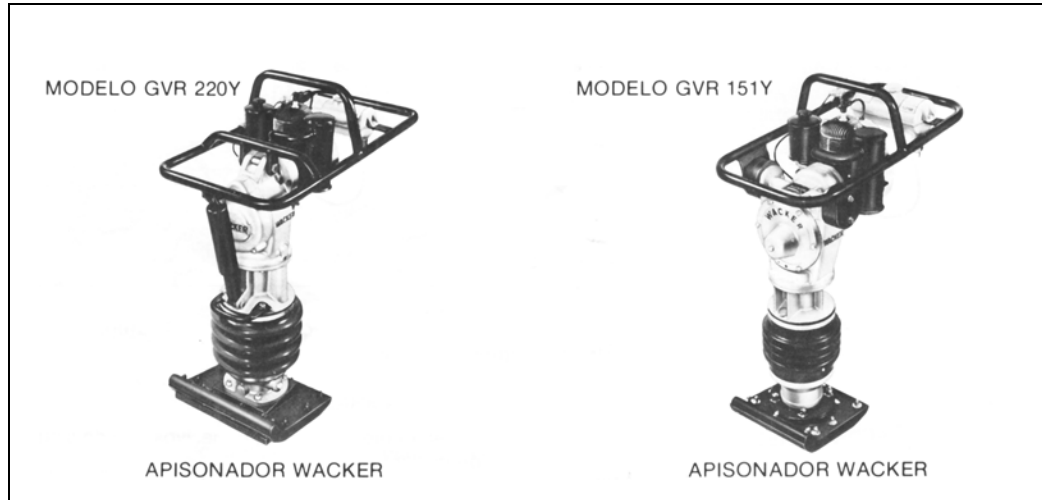
Se deben de considerar ciertos puntos al momento de adquirir o comparar un apisonador, ver figura 21.

Figura 19. Apisonadores



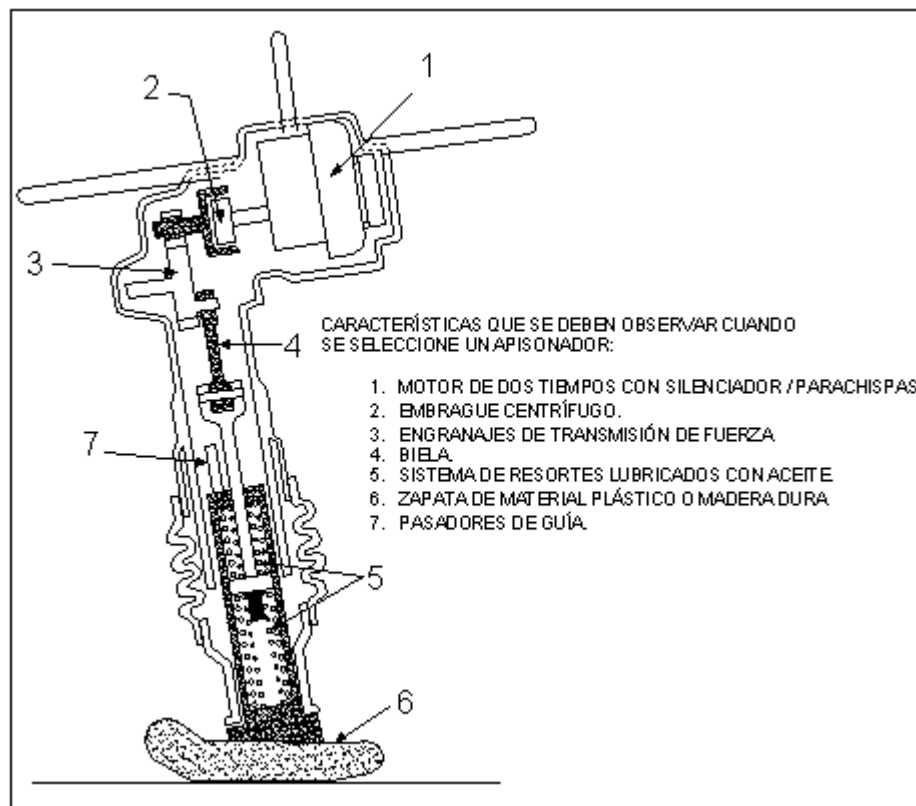
Fuente: Máquinas para compactación del suelo página 18

Figura 20. Modelos de apisonadores



Fuente: Máquinas para compactación del suelo página 16

Figura 21. Corte transversal del apisonador



3.2.3.1 Clasificación y descripción

Según la naturaleza de la energía empleada, los apisonadores se pueden clasificar como

- a. Manuales
- b. De aire comprimido
- c. Hidráulicos
- d. De combustión interna

Los apisonadores manuales, comúnmente llamados mazos se fabrican por lo general en madera, aunque también se fabrican en concreto y en lámina de acero. En el primer caso la masa compactadora está constituida por un prisma rectangular, cuyas dimensiones dependen del peso que se desee aplicar, provisto de dos manerales laterales que se utilizan para su operación. En Guatemala, como promedio, las dimensiones para este tipo de apisonador son: 0.20 x 0.20 x 0.40 mts. y su peso promedio es de 8 kg. En el segundo caso el prisma es sustituido por un cilindro y en el tercero por una placa, ambos provistos de un maneral axial y cuyas dimensiones dependen del peso a aplicar. La operación de este tipo de apisonador consiste en levantarlo hasta cierta altura, 15 cms. más o menos, y luego impulsarlo con fuerza hacia abajo hasta que golpee contra la superficie a compactar.

Desde el punto de vista del rendimiento los tres tipos descritos adolecen de una gran ineficiencia, resultante de factores tales como la limitada energía que el operador puede impartirles, lo limitado del tiempo en que se pueden operar con regularidad y la falta de uniformidad en la presión aplicada. A pesar de esto, su uso es aún muy generalizado en nuestro país.

Los apisonadores de aire comprimido derivan su funcionamiento de la energía neumática generada por un compresor accionado, por lo general, por un motor Diesel. El aire comprimido se transmite, en movimiento lineal simple, por medio de tuberías y mangueras de alta presión y se controla por medio de válvulas; la fuerza impulsora que produce el movimiento se genera por un diafragma, un émbolo o un impulsor giratorio alojado en el interior del compresor, según el tipo de éste.

Esquemáticamente, un apisonador de aire comprimido, del tipo liviano conocido popularmente como bailarina, está constituido por un mango cilíndrico fabricado en tubo de acero y que sirve, a la vez, como tubería para la conducción del aire.

En su parte superior, el mango está provisto de un maneral al que están integradas la toma de aire, que recibe la manguera de suministro, y la válvula de admisión y regulación de flujo, la que se acciona manualmente por el operador. Por su parte inferior va acoplado a una cámara que hace las veces de cilindro y en cuyo interior se desplaza, axialmente, un pistón a cuya cara inferior va fijada la barra que acciona la masa compactadora.

En esta cámara se localiza, también, la válvula de escape, la que en la mayoría de los modelos es directo, aunque en otros está provisto de dispositivos silenciadores; en la cabeza de la cámara va instalada una válvula de disparo, calibrada para permitir el paso del aire únicamente cuando éste ha alcanzado cierta presión que varía según la marca y el modelo del apisonador pero que, como promedio, es de 6 kg/cm^2 .

Al abrirse la válvula de admisión el aire se desplaza por el interior del mango, presionando en forma acumulativa contra la válvula de disparo; al alcanzarse la presión de calibración, ésta se abre y deja pasar el aire, el que aplica al pistón un golpe seco y rápido, desplazándolo hacia abajo.

En su desplazamiento el pistón empuja la barra transmisora que, a su vez, empuja la masa compactadora haciendo que golpee contra el suelo. La amplitud del golpe, en la mayoría de los modelos, es del orden de los 5 cms. El aire empleado es expulsado a través de la válvula de escape y el pistón vuelve hacia arriba, hasta llegar a su posición original, iniciándose un nuevo ciclo. La frecuencia de los apisonadores de aire comprimido también varía según la marca y el modelo, pero está en el rango de 750 a 1,500 percusiones por minuto.

Se fabrica una variante de este tipo de apisonadores, denominada *triplex*, que consiste en una combinación de tres unidades estándar, desprovistas de mango y montadas en una plataforma de fijación que lleva incorporados la toma de aire y el maneral de dirección; el sistema suministra aire a las tres unidades, simultáneamente y a una misma presión.

Para la operación de este tipo de apisonadores se utilizan compresores cuya capacidad es determinada por el número de unidades a operar; por lo general, se recomienda el empleo de compresores de 60 a 250 pies cúbicos por minuto, con mangueras cuyo diámetro varía entre $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ de pulgada.

Los apisonadores hidráulicos funcionan de manera similar a la de los de aire comprimido; su construcción es básicamente igual y su aspecto es muy parecido. La diferencia entre ambos tipos consiste en que en los de tipo hidráulico el fluido que se comprime es aceite, no aire, lo que hace necesaria la

instalación de una manguera adicional de retorno al compresor, con el objeto de cerrar el circuito de flujo del aceite y evitar su desperdicio.

La unidad externa de potencia puede ser un compresor de aceite hidráulico u otro tipo de unidad: camión de volteo, retroexcavadora o tractor, que posea un sistema hidráulico.

Este último caso representa la ventaja mayor de los apisonadores hidráulicos, puesto que si se dispone de alguna de las unidades mencionadas, únicamente es necesario efectuar una sencilla modificación del sistema para acoplarlo a las unidades de compactación. La presión de operación de los compactadores hidráulicos varía entre los 70 y los 140 kg/cm²; su frecuencia varía entre las 1,600 y las 2,300 percusiones por minuto y su amplitud es de 40 a 65 mm.

Tanto en los compactadores de aire comprimido como en los hidráulicos la masa compactadora es desmontable, fabricada en aluminio, acero o hierro fundido y su forma, material y peso dependen de los requisitos de operación. La forma circular es la más generalizada y se recomienda para el relleno de zanjas angostas; el diámetro promedio es de 150 mm. Las formas cuadrada, rectangular y poligonal se utilizan en rellenos de mayor anchura y la forma de riñón se emplea específicamente para el relleno alrededor de postes; el peso promedio de una masa compactadora es de 2 kg.

El mango se puede obtener también, para ambos tipos, en distintas longitudes adaptables a las condiciones del trabajo; como promedio, su longitud es de 1.20 m.

Un tipo especial de apisonador es el constituido por los martillos, neumáticos o hidráulicos, que si bien son diseñados específicamente para trabajos de demolición pueden adaptarse a la compactación de suelos, sustituyendo su elemento activo normal pico, cincel, corta pavimentos, etc. por otro de forma adecuada a este trabajo. Tienen el inconveniente de ser pesados, ruidosos, de poca altura y su fuerza de retroceso, aunque en algunos modelos es amortiguada considerablemente, es grande. Estos factores son determinantes de fatiga del operador y reducen su rendimiento; por esta razón no se les considera recomendables, excepto como unidades de emergencia, y no se describen más detalladamente.

Los apisonadores de combustión interna funcionan por medio de un motor de dos tiempos, accionado por un combustible consistente en una mezcla de gasolina y aceite y dentro de su grupo genérico se distinguen dos tipos principales, a saber

- a. Apisonadores de explosión
- b. Vibroapisonadores

La diferencia fundamental entre ambos tipos consiste en que los apisonadores de explosión carecen de un sistema de embrague que permita suspender la acción del sistema de percusión, mientras que los vibroapisonadores están provistos de un embrague centrífugo que permite el funcionamiento del motor con el sistema de percusión desconectado. Por otra parte, la frecuencia de impacto de los vibroapisonadores es del orden de 450 a 650 percusiones por minuto, mientras que en los de explosión es únicamente de 60 a 80; esto hace que los primeros induzcan en el suelo una vibración de baja frecuencia, de la cual se deriva su nombre.

En los apisonadores de explosión el motor es un cilindro, provisto de un pistón que está integrado a un amasa que se apoya en el suelo. El efecto compactador se obtiene como resultado de dos acciones fundamentales: compactación por impacto de retroceso y compactación por impacto del golpe de la caída libre.

El funcionamiento de un apisonador de explosión se desarrolla como sigue: una vez cargado el cilindro con la mezcla de combustible y aire, el operador, por medio del botón de encendido, hace que de la bujía salte una chispa que inflama la mezcla y la expansión de los gases eleva el apisonador sin la placa apisonadora ni el pistón.

El movimiento ascendente del apisonador comprime un resorte que luego lanza el pistón hacia arriba, al mismo tiempo que la varilla del pistón y la placa apisonadora son elevadas por la acción del resorte recuperador.

El pistón, una vez consumida la energía resultante de la explosión, alcanza su punto más alto y finaliza su carrera ascendente; termina, también, el ascenso de la varilla y de la placa apisonadora, que vuelven a su posición dentro del apisonador. Desde esta posición, la más elevada, el conjunto cae por su propio peso sobre el suelo, compactándolo. Al llegar la placa a su posición original se inicia un nuevo ciclo.

En este tipo de máquina el avance se obtiene inclinando el eje con respecto a la vertical, lo que da origen a una componente horizontal del movimiento.

Como ya se indicó, los vibroapisonadores derivan su nombre del hecho de que aplican un número elevado de percusiones por minuto, induciendo en el

suelo una vibración de baja frecuencia. Están constituidos por un motor de dos tiempos, accionado por gasolina, acoplado a un embrague centrífugo que permite el encendido fácil y rápido y transfiere la potencia al sistema de percusión por medio de un conjunto de engranajes de transmisión. El sistema de percusión consiste en un juego de resortes que, por una parte, almacenan la energía desarrollada por el motor transmitiéndola a la zapata durante su movimiento descendiente y, por otra, sirven como amortiguadores entre las demás componentes mecánicas motor, sistema de embrague y engranajes.

3.2.3.2 Eficacia y campo de aplicación

Por tratarse de máquinas que fundamentalmente actúan por impacto, los apisonadores con la excepción del tipo manual son muy efectivos en la compactación de suelos cohesivos. Su eficacia es bastante satisfactoria y aumenta en razón directa al peso del aparato, al área de contacto con el suelo y a la amplitud, o sea, la altura de despegue de la zapata desde el suelo.

El mayor campo de aplicación de los apisonadores lo constituyen los rellenos en zonas de difícil acceso, tales como atrás de muros, en zanjas o en las proximidades de obstáculos. Los modelos de alta frecuencia de impacto son también muy útiles para la compactación de suelos granulares, especialmente en zanjas, en cuyo caso el material a compactar se encuentra confinado entre las paredes.

Figura 22. Uso y tipos de apisonadores



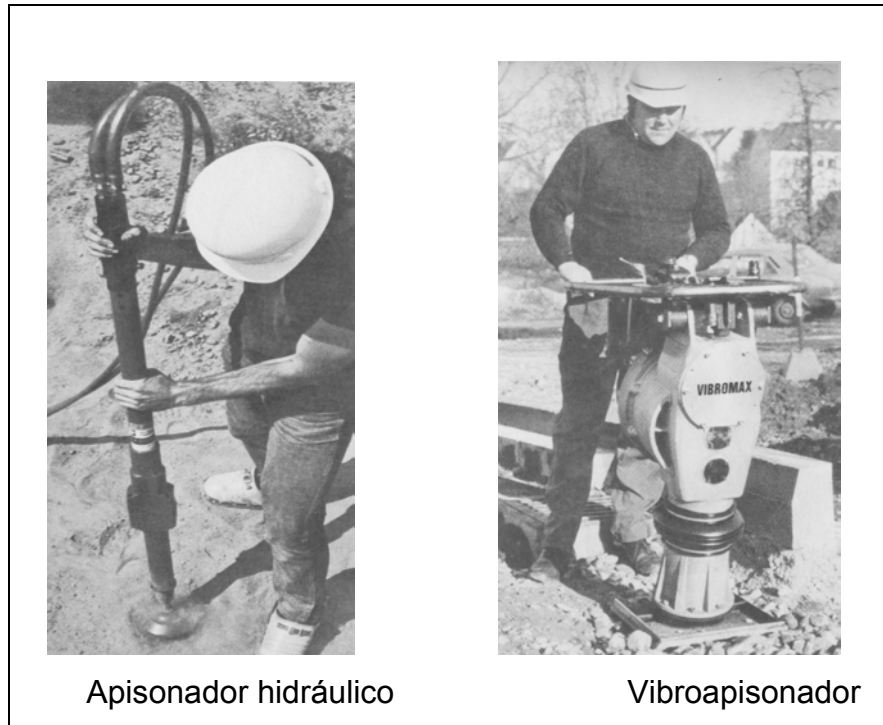
Uso de un apisonador



Apisonador de explosión

Fuente: Máquinas para compactación del suelo página 16

Figura 23. Apisonador hidráulico y vibroapisonador



Fuente: Máquinas para compactación del suelo página 16

3.2.3.3 Ventajas y desventajas

Cada una de las variantes de los apisonadores tiene ventajas y desventajas propias; tienen, sin embargo, la ventaja común de su tamaño reducido y de su peso relativamente bajo, condiciones que redundan en una producción baja que, en determinados casos, podría aumentar su costo de operación en comparación con el de otro equipo.

Los apisonadores manuales, como ya se apuntó, son totalmente ineficientes y no producen densidades satisfactorias: tienen, no obstante, un costo de fabricación extremadamente bajo, sus necesidades de mantenimiento

son casi nulas y su costo de operación se reduce al salario del operador, únicamente.

Tanto los apisonadores de aire comprimido como los hidráulicos son de gran utilidad en la compactación de lechos para tuberías, rellenos en muros de retención del tipo cajón y rellenos alrededor de postes. Ambos tipos adolecen del inconveniente de no ser automóviles, por lo que el apisonado depende del juicio del operador que desplaza el martillo cuando y hacia donde lo considera conveniente. Además, su operación depende de una fuente externa para el suministro de aire o de aceite hidráulico a presión, lo que, sin embargo, puede ser ventajoso sobre todo en el caso de los hidráulicos debido a la gran variedad de fuentes de suministro que se pueden utilizar.

En comparación con los de aire comprimido, los apisonadores hidráulicos tienen las ventajas de funcionar con niveles más bajos de ruido y sin escapes, de requerir menos mantenimiento debido al menor número de piezas móviles y de tener una mayor vida útil, consecuencia de la lubricación constante por el aceite hidráulico, tanto del sistema como de las herramientas.

El empleo de apisonadores de explosión es muy satisfactorio para la compactación de suelos cohesivos, por su doble efecto compactador, su gran energía de golpe cuyo efecto en profundidad les permite compactar capas hasta de 30 cms. y al amplio desplazamiento vertical de su masa compactadora, que facilita su traslación.

Entre sus inconvenientes principales se pueden mencionar su peso elevado y su gran volumen en comparación con los de otros tipos que se traducen en dificultad de transporte; su baja frecuencia de percusión, que no permite la acción vibratoria deseable para suelos granulares o poco cohesivos;

el peligro potencial derivado de su operación por personal no calificado y la falta de uniformidad en la compactación, debida al desplazamiento a juicio del operador.

La ventaja principal de los vibroapisonadores la constituye su adaptabilidad a la compactación de una amplia gama de suelos, comprendida entre los altamente cohesivos a los que es necesario aplicarles una gran fuerza de impacto y los granulares que requieren una acción de vibración. Otras de sus ventajas son la facilidad de guiarlos y su aislamiento efectivo contra el golpe, factores que reducen la fatiga del operador, y sus dispositivos silenciadores, que, además de contribuir a la comodidad de éste, reducen la contaminación ambiental por el ruido.

A continuación se presentan algunas máquinas que se encuentran en el mercado y que son distribuidas para compactar suelos en áreas reducidas.

BVP 11/BVP 22

Compactador de placa vibratorio reversible

Ideal para todo trabajo de compactación secundaria y áreas de edificación.

- a. Particularmente apropiado para zanjas angostas, construcción de aceras y mantenimiento de calles.
- b. Aplicable a materiales granulares no cohesivos y a ciertos suelos semicohesivos de baja plasticidad.
- c. La frecuencia y amplitud variables, proporcionan compactación variable de alto impacto.

Seguridad y conveniencia del operador

- a. Controles direccionales y de velocidad en el manubrio.
- b. Un manubrio libre de vibración reduce la fatiga.

Maniobrabilidad y producción altas

- a. Opera hacia adelante y hacia atrás.
- b. Ruedas de rápido desacople para mayor movilidad.

Mantenimiento mínimo

- a. Montaje de motor libre de vibración.
- b. Todos los rodamientos son autolubricados.
- c. Mecanismo de vibración en aceite.
- d. Motor Diesel con potencia de reserva.

Dimensiones	BVP 11		BVP 22	
Peso de trabajo	245 kg.	540 lbs.	500 kg.	1103 lbs.
Peso de trabajo con la placa lateral	275 kg.	606 lbs.	-----	-----
Área de trabajo de la placa	420 * 620 mm	16.5" * 24.4"	600 * 1000 mm	23.6" * 39.4"
	620 * 600 mm	24.4" * 23.6"	-----	-----
Largo total con la barra de dirección	1600 mm	63"	1600 mm	63"
Altura sin ruedas	960 mm	37.8"	810 mm	31.9"
Motor (Diesel)				
Fabricante	Hatz		Hatz	
Modelo	ES 75		ES 780	
Número de cilindros	1		1	
Sistema de enfriamiento	Aire		Aire	
Potencia	7 hp (SAE)		10 hp (SAE)	
RPM	2800		2700	
Capacidad tanque de combustible	5 lts	1 - 1/3 gal.	5 lts	1 - 1/3 gal.
Rendimiento				
	Hasta		Hasta	
Velocidad de desplazamiento adelante y atrás	25 m / min.	82 pies / min	25 m / min.	82 pies / min.
Pendientes superables (adelante y atrás)	Hasta 30°		Hasta 30°	
Cubrimiento por hora sin placa lateral	592 - 836 m ²	708 - 1000 yd ²	836 m ²	1000 yd ²

BW 75E

Rodillo vibratorio de un solo tambor

Versatilidad - Alta producción en amplia gama de materiales y aplicaciones

- a. Compacta suelos granulares y semicohesivos y asfalto.
- b. Aplicable a áreas angostas y confinadas superficies de caminos, reparación y mantenimiento.
- c. Equipado con sistema de agua y raspadores.
- d. Un solo rodillo con fuerza compactadota de ato impacto.

Altamente maniobrable

- a. Pivota 180 grados.
- b. Sin proyecciones laterales.
- c. Rueda-guía opcional para mayor estabilidad.
- d. Ganchos para puerta trasera, opcionales.

Fácil de operar

- a. Controles convenientemente montados en el manubrio.
- b. Manubrio aislado de toda vibración.

Mantenimiento mínimo

- a. Embrague vibratorio libre de mantenimiento.
- b. Sin puntos de engrase: lubrica permanente.
- c. Robusto motor Diesel enfriado por aire.

Tabla II. Especificaciones BW 75E

Peso y dimensiones		
Peso operacional total	448 kg.	992 lbs.
Ancho	750 mm	29.5"
Diámetro del tambor	600 mm	23.6"
Largo total con manubrio	2200 mm	84.6"
Ancho total	871 mm	34.3"
Altura total	1150 mm	45.3"
Motor (Diesel)		
Hatz Diesel E671	4 hp @ 3000 rpm	
Número de cilindros	1	
Sistema de enfriamiento	Aire	
Velocidades		
1era. velocidad	25 m / min.	79 pies / min
2da. Velocidad	47 m / min.	150 pies / min
Vibrador		
Excitador	pesos excéntricos rotatorios	
Frecuencia de vibración	70 Hz	4200 vpm
Fuerza centrífuga	18637 N	4190 lbs
Capacidades del tanque		
Tanque de combustible	5 lts	1.3 gal.
Tanque de agua	21 lts	5.5 gal.
Equipo opcional		
Ganchos para puerta trasera		
Rueda-guía		

Fuente: Guía de productos BOMAG Pág. 4

BW 35

Rodillo vibratorio de doble tambor para zanjas

Compacta suelo y asfalto en áreas estrechas y confinadas y a lo largo de estructuras

- a. Vibración en ambos tambores.
- b. Tambores con venas para suelos cohesivos y semicohesivos.

- c. BW 35S con tambores lisos, tanque de agua y esteras para compactar asfalto.
- d. Lados libres de proyecciones.
- e. No puede enterrarse en las paredes de la zanja.
- f. La alta frecuencia, peso de la máquina y la amplitud generan una fuerza centrífuga de gran impacto.

Maniobrabilidad

- a. Excelente habilidad para subir pendientes.
- b. Rodillos con venas para tracción.
- c. Dos velocidades hacia delante, dos hacia atrás.

Seguridad y conveniencia del operador

- a. Palancas en el manubrio para un control efectivo.
- b. El diseño vertical de las palancas reduce el posible roce de la mano del operador contra la pared de la zanja.
- c. Altura del manubrio de mando ajustable.

Mantenimiento mínimo

- a. Mecanismo propulsor funciona en aceite.
- b. Sin engrase; autolubricado.
- c. Potencia Diesel con capacidad de reserva.

Tabla III. Especificaciones BW 35

Peso y dimensiones		
Peso total	500 kg.	1102 lbs
Ancho de trabajo	390 mm	15.4"
Ancho total	470 mm	18.5"
Largo total con manubrio	2185 mm	86.0"
Altura	935 mm	36.8"
Diámetro del tambor	350 mm	13.8"
Motor (Diesel)		
Hatz Diesel E71	4.3 hp (SAE) @ 2500 rpm	
- Velocidades		
1era. velocidad	21 m / min.	71 pies/min.
2da. Velocidad	41 m / min.	136 pies/min.
- Pendientes superables		
Con vibración	hasta 35%	
Sin vibración	Hasta 55%	
Máximo cubrimiento por hora	467 m ²	559 yd ²
Vibrador		
Excitador	pesos excéntricos rotatorios	
Dirección de la vibración	Vertical	
Frecuencia de vibración	43 Hz	2600 vpm
Fuerza centrífuga / tambor	9803 N	2204 lbs
Fuerza centrífuga total	19607 N	4408 lbs.
Amplitud nominal	0.84 mm	0.033"
Capacidades del tanque		
Tanque de combustible	5 lts	1 - 1/3 gal.

Modelo opcional BW 35S		
Especificaciones		
Las mismas del modelo BW 35, excepto:		
Tambores lisos de compactación de asfalto		
Peso total	481 kg.	1060 lbs.
Capacidad de tanque de agua	24 lts.	6.3 gal.

Fuente: Guía de productos BOMAG Página. 6

65S

Rodillo vibratorio de doble tambor

Particularmente eficaz en capas delgadas y medianas, en suelos arenosos y asfalto

- a. Aplicable al mantenimiento de caminos y calles, alcantarillados, aceras, parques de recreo, áreas de parqueo, y campos de golf.
- b. Para uso en arena muy fina o uniforme, algunas arcillas con cieno, materiales estabilizados, y asfalto.
- c. Ofrece vibración en cada tambor.
- d. El sistema de agua con esteras es equipo de norma.

Peso liviano, altamente móvil

- a. Excelente capacidad de subir gracias a la tracción en ambos tambores.
- b. Lados libres de proyecciones.
- c. Dos velocidades hacia delante y dos hacia atrás.
- d. Bajo centro de gravedad y distribución uniforme del peso.
- e. Ganchos de puerta trasera (opción) para fácil transporte.

Comodidad y conveniencia del operador

- a. Palancas montadas en el manubrio para un control efectivo.
- b. Manubrio de conducción de altura ajustable.
- c. Arranque eléctrico opcional.

Diseñado para tiempos mínimos del operador

- a. Mando vibratorio a prueba de polvo y agua.
- b. Mecanismo propulsor bañado en aceite.
- c. Cojinetes de transmisión y vibratorios empacados permanentemente en grasa.
- d. Motor Diesel con reserva de potencia.

Tabla IV. Especificaciones 65S

Peso y dimensiones		
Peso bruto	604 kg.	1332 lbs.
Ancho de trabajo	650 mm	25.6"
Ancho total	780 mm	30.7"
Largo total con manubrio	2150 mm	84.6"
Altura total	940 mm	37.0"
Diámetro del tambor	400 mm	15.7"
Claro para andenes	200 mm/130 mm	7.9" / 5.1"
Motor (Diesel)		
Hatz Diesel ES75	5.4 hp (SAE) @ 2500 rpm	
- Velocidades		
1era. velocidad	31 m / min.	103 pies / min.
2da. Velocidad	53 m / min.	175 pies / min.
- Pendientes superables		
Con vibración	19°	35%
Sin vibración	29°	55%
Máximo cubrimiento por hora	1977 m ²	2365 yd ²
Vibrador		
Excitador	pesos excéntricos rotatorios	
Dirección de la vibración	Vertical	
Frecuencia de vibración	58 Hz	3500 vpm
Fuerza centrífuga / tambor	11765 N	2645 lbs
Fuerza centrífuga total	23530 N	5291 lbs.
Amplitud nominal	0.42 mm	0.016"
Capacidades del tanque		
Tanque de combustible	5 lts	1.3 gal.
Tanque de agua	52 lts	13.7 gal.
Equipo opcional		
Ganchos de puerta trasera		
Arranque eléctrico		

Fuente: Guía de productos BOMAG Página. 8

60S / 75S

Rodillos vibratorios de doble tambor

Proveen alta compactación en áreas confinadas sobre una amplia gama de materiales

- a. Aplicable a calles, zanjas y alcantarillados, aceras, áreas de parqueo, interior de fábricas, colegios, iglesias.
- b. Para uso en material cohesivo y no-cohesivo, materiales estabilizados y asfalto.
- c. Vibra cada tambor para una potente compactación sincronizada.
- d. La amplitud, frecuencia y peso de la máquina dan alta fuerza centrífuga para una compactación adecuada.
- e. El sistema de agua con esteras es equipo de norma.

Peso liviano, altamente móvil

- a. Fácilmente pasa por el marco de la puerta de 76 cm.
- b. Dos velocidades hacia delante y dos hacia atrás.
- c. Lados libres de proyecciones.
- d. Bajo centro de gravedad y distribución uniforme del peso.

Comodidad y conveniencia del operador

- a. Palancas montadas en el manubrio para un control efectivo.
- b. Manubrio de conducción de altura ajustable.
- c. Dirección de poco esfuerzo (BW 75S solamente) opcional.
- d. Arranque eléctrico disponible, opcional.

Tabla V. Especificaciones 60S / 75S

Dimensiones	BW 60S		BW 75S	
Peso operacional	840 kg.	1852 lbs.	928 kg.	2046 lbs.
Ancho de trabajo	600 mm	23.6"	750 mm	29.5"
Ancho total	740 mm	29.1"	895 mm	35.2"
Largo total con manubrio	2900 mm	114.2"	2850 mm	112.2"
Altura	995 mm	39.2"	1045 mm	41.1"
Diámetro del tambor	480 mm	18.9"	480 mm	18.9"
Claro para andenes	260mm/140mm	240mm/140mm	10.2" / 5.5"	9.4" / 5.5"
Motor (Diesel)				
Fabricante	Hatz		Hatz	
Modelo	E 79		E 780	
Potencia	7.5 hp		9 hp	
RPM	2500		2700	
- Velocidades				
1era. Velocidad	25 m / min.	82 pies / min.	26 m / min.	87 pies / min.
2da. Velocidad	43 m / min.	142 pies / min.	47 m / min.	153 pies / min.
- Pendientes superables				
Sin vibración	29°	55%	29°	55%
Con vibración	19°	35%	19°	35%
Cubrimiento máximo por hora	1561 m2	1867 yd2	2096 m2	2507 yd2
Vibrador				
	Pesos		Pesos	
Excitador	Excéntricos	Rotativos	Excéntricos	Rotativos
Dirección de la vibración	Vertical		Vertical	
Frecuencia de vibración	51 Hz	3050 vpm	55 Hz	3300 vpm
Fuerza centrífuga / tambor	14709 N	3307 lbs.	19611 N	4409 lbs.
Fuerza centrífuga total	29418 N	6614 lbs.	39222 N	8818 lbs.
Amplitud nominal	0.46 mm	0.018"	0.49 mm	0.019"
Capacidad de tanques				
Tanque de combustible	5 lts.	1.3 gal.	9 lts.	2.4 gal.
Tanque de agua	45 lts.	11.9 gal.	60 lts.	15.9 gal.
Equipo opcional				
Arranque eléctrico Dirección mecánica (BW 75S solamente)				

Fuente: Guía de productos BOMAG Página. 10

Diseñado para tiempos mínimos de paro

- a. Mando vibratorio a prueba de polvo y agua.
- b. Mecanismo propulsor bañado en aceite.
- c. Rodamientos de la transmisión y vibratorios empacados permanentemente en grasa.
- d. Motor Diesel con reserva de potencia.
- e. Piezas intercambiables entre ambos modelos.

3.3 Control de la compactación

El control de la compactación tiene por objeto determinar si un suelo sometido a ese proceso fue compactado debida y satisfactoriamente. La determinación se lleva a cabo evaluando los resultados obtenidos, es decir, midiendo las cualidades físicas y mecánicas del suelo -densidad máxima y humedad óptima- y comparando los resultados con los patrones establecidos previamente en el laboratorio. La práctica más corriente consiste en determinar el grado de compactación, o sea la relación seca máxima obtenida en el laboratorio, en conformidad con un procedimiento determinado por especificaciones. Esta relación se expresa por la fórmula siguiente:

$$\text{Grado de compactación} = \frac{\gamma_d \text{ Campo}}{\gamma_d \text{ Máx.}} \times 100$$

El control de la compactación se reduce, entonces, a la determinación del peso unitario seco, o densidad seca del suelo, en el sitio de la obra.

3.3.1 Control de las características del suelo en el campo

La determinación del peso unitario seco y del contenido de humedad se puede hacer directamente. Para ello se excava un agujero en la capa a ensayar y se pesa el material extraído, primero húmedo y luego seco, para medir su contenido de humedad; por aparte, se determina el volumen del agujero. La determinación del contenido de humedad es más delicada, pues debe hacerse sobre una porción realmente representativa del material extraído, la que se seca en una estufa u horno a 105° C.

Se puede determinar, también, midiendo la presión de gas resultante de una reacción química. Los resultados obtenidos con este último sistema son exactos cuando se trata de suelos no cohesivos, pero en suelos arcillosos pueden mostrar discrepancias y conducir a errores.

En la determinación del peso unitario seco del suelo en el campo, el problema principal radica en la medida del volumen exacto del agujero; por lo general, éste no tiene una forma geométrica regular y sus paredes presentan asperezas que dificultan más la medida. El procedimiento a emplear para la cubicación del volumen depende del tipo de suelo y puede ser uno de los métodos siguientes

- **Método del cilindro cortante**

Consiste en introducir en el suelo un cilindro de bordes cortantes, por medio del cual se extrae una muestra de volumen conocido: el volumen del cilindro. Esta muestra se ensaya para determinar su contenido de humedad y su peso unitario seco.

- **Método del cono de arena**

En este método, posiblemente el más utilizado en nuestro medio, el volumen se determina llenándolo con una arena suelta, seca, calibrada y de granulometría uniforme la que se deja caer, a través de un embudo, desde una altura determinada.

- **Método del balón**

En este método se utiliza un aparato provisto de una membrana de hule, la que se coloca dentro del agujero y se llena con agua; el volumen del agujero será igual al del agua suministrada a la membrana y se determina comparativamente.

- **Método nuclear**

El método más reciente y novedoso para determinar el peso unitario seco y el contenido de humedad de un suelo es el llamado método nuclear. Consiste en proyectar hacia el suelo compactado un haz de rayos Gamma, midiendo el efecto de las radiaciones a través de éste, por medio de un contador Geiger. El principio básico del método es que un suelo denso absorbe más radiación que uno suelto y se aplica por medio de un medidor nuclear de densidad humedad, que permite la lectura directa del peso unitario y del contenido de humedad y con el cual se pueden efectuar pruebas, tanto superficiales en la capa superior del relleno como profundas en todo su espesor.

3.3.2 Controles sobre el compactador

Según se ha expuesto anteriormente, la diferencia fundamental entre la compactación de suelos en el laboratorio y en el campo estriba en la energía aplicada. La energía de compactación utilizada en el campo es suministrada por el equipo de compactación, de cualquiera de los tipos descritos, cada uno de los cuales tiene sus propias características de compactación -espesor de capa, número de pasadas y contenido de humedad- que es necesario determinar para poder realizar un buen trabajo al menor costo posible.

Para determinar dichas características es recomendable, y en algunos casos necesarios antes de iniciar el trabajo, efectuar un ensayo de compactación de campo. Este ensayo se realiza delimitando en el sitio de la obra un tramo experimental, de dimensiones adecuadas al tipo de obra y que proporcione un área apropiada de trabajo. El procedimiento más utilizado es el de número de pasadas con un espesor de capa definido, que se describe a continuación.

3.3.2.1 Método del número de pasadas con un espesor de capa definido

Este método combina la compactación de un tramo experimental con la determinación de los pesos unitarios secos y del contenido de humedad por alguno de los procedimientos descritos. En síntesis, el procedimiento a seguir es el siguiente:

- a. Selección del tipo de compactador a emplear. Esta selección se hace con base en las ideas expuestas anteriormente.

- b. Elección del espesor de capa a compactar. El espesor puede variar entre los valores siguiente: capas de 0.10 m. cuando se utilizan apisonadores de aire comprimido o hidráulicos; de 0.15 a 0.20 m. cuando se utilizan vibroapisonadores, y de 0.25 a 0.40 m. cuando se utilizan compactadores vibrantes (rodillos o planchas).
- c. Elección del contenido de humedad. Por lo general, se escoge de dos a tres contenidos de humedad; por ejemplo, si para el suelo que se va a compactar se obtuvo en el laboratorio un contenido óptimo del 14%, se prueba con el 12%, el 14% y el 16%.

Lo más recomendable es probar con contenidos de humedad por debajo del óptimo, porque en la obra, si el contenido de humedad no es apropiado, es más fácil humedecer el suelo que secarlo.

- d. Dimensionamiento del tramo. La longitud del tramo se establece según el número de contenidos de humedad a ensayar, a manera de disponer, en el sentido longitudinal del tramo, de varios subtramos con contenidos de humedad diferentes; en los extremos se deja algún espacio adicional, para que el compactador alcance en ellos una velocidad adecuada y una buena dirección. El ancho del tramo se fija de acuerdo con el ancho de trabajo de la máquina y con su programa de pasadas.
- e. Ejecución del ensayo. Una vez determinados el tipo de compactador a emplear, el espesor de capa, los contenidos de humedad y las dimensiones del tramo, se procede a tender el material teniendo cuidado de esparcirlo bien y de resguardarlo, hasta donde sea posible, de los cambios de humedad. Luego se procede a la compactación,

estableciendo un programa de número de pasadas y ciñéndose a éste; por ejemplo, se dan dos pasadas a cada subtramo, luego cuatro, luego ocho y así sucesivamente hasta llegar a las dieciséis pasadas.

- f. Medida de la densidad y de la humedad. Después de un número específico de pasadas se determina para cada uno de los subtramos los pesos unitarios secos y los contenidos de humedad resultantes y se traza la curva de densidad humedad correspondiente a cada energía de compactación aplicada. De esta curva se deducen el peso unitario seco máximo y el contenido óptimo de humedad para cada determinado número de pasadas, operación que se repite para cada uno de los subsiguientes números de pasadas.

Punteando, en un sistema de coordenadas, los pesos unitarios secos máximos obtenidos, sobre el eje de ordenadas y el número de pasadas sobre el eje de las abcisas, se obtiene para el tipo de suelo ensayado y con el espesor de capa definido el número de pasadas necesario para alcanzar un peso unitario determinado.

Como se puede observar, la realización del ensayo de campo conduce a la elección de una humedad de compactación y de un número de pasadas de la máquina. Una vez establecidos estos valores, no queda más que controlar que la compactación se realice exactamente en las mismas condiciones determinadas en el ensayo; para ello se controla la colocación y el tendido del material, el tipo de compactador empleado, el número de pasadas y, lo que es más importante, el contenido de humedad. Este último valor, así como el del peso unitario seco, se debe verificar por cualquiera de los métodos antes descritos; esta verificación se debe efectuar después de compactar cierto número de capas, en vez de efectuarla capa por capa.

4. COSTO DE LA COMPACTACIÓN

4.1 Mantenimiento del equipo

El mantenimiento defectuoso es la causa principal de la falla prematura de la maquinaria de construcción. Debido a que las máquinas de compactación del suelo funcionan exclusivamente bajo condiciones de abundancia de polvo y vibración, el mantenimiento adecuado de la máquina es vital para prolongar su duración.

A continuación se presentan algunas recomendaciones para el mantenimiento y reparación que se aplican a los distintos tipos de máquinas de compactación.

1.1.1 Apisonadores

El polvo puede nombrarse como el enemigo número uno de cualquier motor. Por consiguiente, se deben de tomar en cuenta las siguientes recomendaciones

- El filtro de aire en todos los apisonadores debe limpiarse cuando menos una vez a intervalos de 8 horas de trabajo. También se debe examinar el filtro por si tiene escapes.
- De ningún modo deben tolerarse rajaduras del elemento filtrante de aire seco.

- Tanto los bordes superior e inferior del elemento deben asentar como es debido en sus planchas metálicas.
- Si aire sin filtrar penetra en el motor, en muy poco tiempo se perdería compresión y el cilindro del motor y los anillos de los pistones sufrirían daño irreparable.
- La lubricación del sistema de resortes del apisonador debe verificarse. Esto se hace desde afuera mediante un indicador de vidrio del aceite.
- Cambiar el aceite en el sistema después de 50 horas de servicio, luego a intervalos de 300 horas de servicio.
- Lubricar los modelos que requieren grasa por las boquillas de engrase del *cárter* y los dos pasadores de guía cada 8 horas de trabajo.
- El funcionamiento errático o la disminución del rendimiento de un apisonador generalmente se debe a que están obstruidas las lumbreras de salida en el escape del motor. Si así sucede, limpiar las lumbreras e inspeccionar el silenciador. Si el problema de obstrucción ocurre frecuentemente, examinar la mezcla de combustible y aceite. La relación correcta es 32:1. El aceite insuficiente causa desgaste excesivo por falta de lubricación.
- El daño que sufren las zapatas apisonadoras y la rotura de los silenciadores a menudo se debe a que hay pernos flojos. Siempre apretar los pernos de arado en la zapata e inspeccionar todas las tuercas que sujetan el silenciador en el motor. El operador debe saber cómo manejar el apisonador de manera que la zapata golpee paralelamente la

superficie del suelo. No su uña, ni su talón. Esto prolonga la duración de la zapata y de los pasadores de guía.

- Evitar la aceleración excesiva del apisonador, pues esto causa daño a las zapatas y contribuye al funcionamiento errático y al manejo dificultoso. La mejor compactación se logra cuando el apisonador produce un movimiento apisonador rítmico y uniforme. Debe tenerse cuidado cuando se cargan y descargan los apisonadores. Los resortes pueden debilitarse y hasta romperse, el mango puede quebrarse como también los amortiguadores de caucho, si se deja caer la máquina sobre suelo duro desde mucha altura. Lo mismo puede suceder si el operador ejerce presión excesiva en el mango para el manejo. Así mismo, el error grave de levantar el apisonador por su mango de guía es peligroso.
- El motor de dos tiempos enfriado por aire, del apisonador, siempre toma uno o dos minutos para calentarse para el arranque inicial. Durante este período es cuando los carburadores a menudo se ajustan mal debido a que parece que las máquinas no están funcionando correctamente. Esta práctica debe evitarse. Sin embargo, cuando el carburador está fuera de ajuste, el surtidor principal debe regularse haciendo girar el tornillo principal completamente hacia adentro, luego haciéndolo girar hacia afuera de 7/8 a 1 vuelta. Tener cuidado de no forzar el tornillo hacia adentro, puesto que esto puede causar daño a la aguja y/o su asiento.

1.1.2 Planchas vibratoras

Las planchas vibratoras son máquinas relativamente sencillas y generalmente requieren poco mantenimiento, pero al igual que los apisonadores, se deben de tomar en cuenta las siguientes recomendaciones.

- El filtro de aire debe siempre estar en buen estado de funcionamiento. Examinar y limpiar el filtro cada 8 horas de servicio, o más a menudo, según sea necesario.
- En las unidades con motor de gasolina, reemplazar el cartucho del filtro de aire según se recomienda en el manual de instrucciones.
- En los motores Diesel, cambiar el aceite en el filtro de aire de tipo de baño de aceite cada 8 horas de servicio o con más frecuencia cuando hay mucho polvo. Nunca se haga funcionar un motor sin su filtro de aire.
- Examinar y cambiar el aceite del motor según las recomendaciones dadas para cada modelo. Emplear aceite detergente de buena calidad de la viscosidad recomendada para cada clima.
- Examinar y cambiar el aceite del excitador, no se debe llenar excesivamente el excitador con aceite. Un excitador con exceso de aceite causa el recalentamiento y la formación de espuma del aceite que puede resultar en pérdida de potencia (ya que la mayor parte de la energía del motor para mover y hacer salpicar el aceite se usa innecesariamente).
- Debe limpiarse la cámara de combustión del motor para extraer los depósitos de la combustión. Observar en este punto que puede usarse gasolina con bajo porcentaje de plomo en los motores de las planchas vibradoras con algunas ventajas adicionales en cuanto a bujías y válvulas más limpias y menos contaminación del aceite lubricante.

- Inspeccionar los amortiguadores de caucho debajo de la consola del motor o en el mango y reemplazar los que estén defectuosos; es decir, rajados o endurecidos. Examinar la tensión de la correa para evitar que se resbale (correas flojas) y para impedir la sobrecarga de los cojinetes y los amortiguadores (correas apretadas).
- Mantener lleno el tanque de combustible en todas las máquinas con motor Diesel. Evitar quedarse sin combustible Diesel en el campo. Si esto sucede, el sistema de combustible debe purgarse para expulsar las burbujas de aire antes de volver a arrancar. Todas las planchas grandes van dotadas de argollas de levante para ser movidas con grúas. No se levanten las máquinas de otra manera a fin de evitar que los resortes o los amortiguadores se rompan.
- Mantenga la base de la plancha limpia y libre de acumulación de tierra. La acumulación de tierra sólo sirve para aumentar la carga innecesariamente, dando por resultado el recalentamiento del aceite del excitador y la disminución del rendimiento.

1.1.3 Rodillos

A diferencia de las planchas vibratoras reversibles, el rodillo tiene un transmisión con engranajes y embragues. Esto requiere que la máquina sea parada momentáneamente mientras se cambia la dirección de su movimiento. Por lo tanto, para proteger y prolongar la duración de los embragues y engranajes, tener cuidado al cambiar la dirección del movimiento, de cambiarlo lentamente, pero con firmeza.

- Cuando se seleccione una velocidad alta o baja, el rodillo debe estar en movimiento. Suspender la vibración, pare el rodillo poniendo la palanca de control de la dirección en neutral, luego seleccionar la velocidad. Esto facilita la conexión de los engranajes e impide la tensión innecesaria en los dientes de los mismos.
- Inspeccionar y cambiar regularmente el aceite del motor, lo mismo que el aceite en el baño de aceite del filtro de aire. Esto se hace en todos los motores de combustión interna y es un procedimiento que no debe descuidarse. Si se afloja ya sea la palanca de vibración o la palanca de avance/retroceso, es decir, si la acción resulta tan suave que no se siente cierta resistencia al cambiar de posiciones de avance y retroceso, entonces deben ajustarse los embragues correspondientes. Los embragues están colocados dentro de la caja de engranajes y requieren ajuste con poca frecuencia. Consultar el manual de instrucciones respecto a cómo efectuar el ajuste.
- Ningún otro trabajo de mantenimiento se necesita en los rodillos de tambor doble. Todos los cojinetes y los engranajes van lubricados permanentemente (para 1000 horas de servicio o más) y van sellados contra polvo y humedad.

4.2 Costos de la compactación

Siendo el costo un factor importante en cualquier proyecto de construcción, debe tenerse en cuenta el costo de la compactación. Los ejemplos dados a continuación indican cómo puede calcularse el costo del trabajo de compactar y cómo el rendimiento de la máquina puede afectar considerablemente estos costos. Debido a que los precios de las máquinas

están sujetos a cambios, el ejemplo es una comparación entre dos planchas vibradoras.

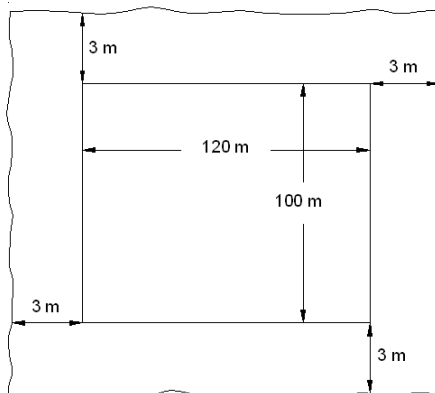
La información sobre los precios es hipotética, pero las cifras y fórmulas de rendimiento son reales y pueden ser utilizadas por los calculistas de la obra para determinar el costo de la compactación.

Tabla VI. Descripción de las máquinas

Descripción	Unidad	Máquina A	Máquina B
Peso	kg	83	121
Ancho de la plancha	cm	53	53
Fuerza centrífuga	kN	12.7	20.9
Penetración	cm	25	33
Velocidad	m/min.	20	27
Consumo de combustible	lts/hr.	1.1	1.6
Rendimiento	m ³ /hr.	151	280
Precio hipotético	Moneda nacional	9600	12000

Al compactar el relleno granular alrededor de las paredes de los cimientos de un edificio, el cual es rectangular, de 120 m x 100 m, siendo el ancho de la zanja alrededor del edificio de 3 m y la profundidad de la zanja también de 3 m. Ver figura 24.

Figura 24. Diagrama del sitio de trabajo



Volumen del suelo que va a compactarse

$$= 2 [(100 \times 3 \times 3) + (126 \times 3 \times 3)]$$

$$= 2 \times (900 + 1134)$$

$$= 2 \times 2034$$

$$= 4,068 \text{ m}^3$$

Usando la máxima penetración efectiva de cada máquina, puede obtenerse una densidad *Proctor* de 95 a 100% después de tres pasadas siempre que la densidad sea casi la óptima. Se puede determinar el costo total de adquirir y operar las dos planchas vibratoras suponiendo que

- a. La vida de una máquina es de 3000 horas (4 horas diarias, 250 días de trabajo por año, 3 años).
- b. La depreciación se determina prorrateando el precio de la máquina a base de las 3,000 horas de duración.
- c. El costo del mantenimiento es 80% del costo de la depreciación.
- d. Costo del combustible, Q 4.35 por litro.*
- e. Costo por operador, Q 96.00 por hora. *

*Estos costos pueden variar.

Según los datos anotados, la depreciación, el mantenimiento y el costo del combustible para ambas máquinas se determina de la siguiente manera:

Máquina A

- Depreciación

$$(Q. 9,600 / 3,000 \text{ hr}) = Q. 3.20$$

- Costo de mantenimiento

$$Q. 3.20 * 80\% = Q. 2.56$$

- Costo de combustible

Q. 4.35 por litro

Máquina B

$$(Q. 12,000 / 3,000 \text{ hr}) = Q. 4.00$$

$$Q. 4.00 * 80\% = Q. 3.20$$

Q. 4.35 por litro

Costo por hora

Si se utiliza la máquina A este sería: Q. 10.11

Si se utiliza la máquina B este sería: Q. 11.55

Usando la máquina A de la plancha vibradora

- Producción nominal por pasada 151 m³ / hr
- Producción en 3 pasadas (151 / 3) = 50.3 m³ / hr
- Tiempo requerido para compactar 4,068 m³ (4,068 / 50.3) = 80 horas

Tomando como base el costo del equipo de Q. 10.11 por hora; mano de obra Q. 96.00 por hora, el costo total del empleo de la máquina A para este trabajo será:

$$Q. 106.11 * 80 \text{ horas} = Q. 8,488.80$$

Usando la máquina B de plancha vibradora

- Producción nominal por pasada 280 m³ / hr
- Producción en 3 pasadas (280 / 3) = 93.3 m³ / hr
- Tiempo requerido para compactar 4,068 m³ (4,068 / 93.3) = 44 horas

Tomando como base el costo del equipo de Q. 11.55 por hora; mano de obra Q. 96.00 por hora, el costo total del empleo de la máquina B para este trabajo será

$$Q. 107.55 * 44 \text{ horas} = Q. 4,732.20$$

Resumiendo los cálculos anteriores se obtiene lo siguiente:

Tabla VII. Cuadro de resumen

	Máquina A	Máquina B
Costo del equipo (depreciación, mantenimiento y combustible por hora)	Q. 10.11	Q. 11.55
Mano de obra por hora	<u>Q. 96.00</u>	<u>Q. 96.00</u>
Costo total por hora	Q. 106.11	Q. 107.55
Tiempo necesario para completar el trabajo en horas	<u>* 80</u>	<u>* 44</u>
Costo total del trabajo	<u><u>Q. 8488.8</u></u>	<u><u>Q. 4,732.20</u></u>
Ahorro empleando la máquina B		Q. 3,756.60

Obsérvese que

- El costo por hora de la depreciación, el mantenimiento, y el combustible para la máquina B es 12% mayor que para la máquina A (Q. 11.55 contra Q. 10.11).
- La máquina B requiere casi la mitad del tiempo requerido por la máquina A para terminar el trabajo (44 horas contra 80 horas).

En vista de lo anterior, no se debe suponer que la máquina B resulta costosa para adquirir y operar. Su alto rendimiento compensa el mayor costo de la inversión inicial.

Puesto que la mano de obra constituye el mayor costo de la operación de compactar en áreas de tamaño limitado, siempre conviene, por consiguiente, recomendar la máquina de mayor producción en vez de la más barata.

Una máquina pequeña cuesta menos para adquirirla, pero más en mano de obra. Combinando los costos de la máquina y de la mano de obra, el costo total para terminar el trabajo es de Q. 8,488.80 con la máquina pequeña, en comparación con Q. 4,732.20 con la máquina más grande. Esto significa que la máquina A más pequeña cuesta casi el doble para terminar el trabajo que la máquina B más grande. El costo final es lo que determina la ganancia o pérdida del procedimiento de compactación.

En general, para cada obra de compactación, debe considerarse el costo del equipo añadido al costo de la mano de obra para luego efectuar una comparación entre ambos costos.

Con esta información, el lector tendrá mejor conocimiento de lo que es la compactación del suelo y la maquinaria para el objeto, y estará mejor preparado para recomendar las máquinas adecuadas para el trabajo. La tabla VIII servirá de ayuda para seleccionar la máquina correcta para cada aplicación.

Tabla VIII. Aplicaciones de las máquinas compactadoras

MODELO \ APLICACIÓN	MODELO																						
	GVR 75Y	BS 50	GVR 100	GVR 151Y	BS 60Y	GVR 200Y		VPG 155	VPG 160B/R/R	VPG 250	VPG 310	VPG 2550R/K/B	VPG 600	DPS 2350	DPS 4570	DP U 3345	DV U 3001N	DV U 3001W	DV U 4001	WT 4T, W55T	WDH 86-110	R 900	
Site los gravillares, arena y grava	●	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Site los coquestrós, limo y arcilla	●	●	●	●	●	●																●	
Site los mixtos	●	●	●	●	●	●		○	○	●	●	●	○	●	●	○	○	○	○	○	●	●	●
Preparación de la base de arena para losas de hormigón	○	○	○	○	○	○		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○
Grava, piedra triturada, grava e hierro y bases de ligazón de tráfico	○	○	○	○	○	○		○	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Construcción sanitaria y de colectores de agua pluvial	●	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●	○	●	○	●	●	○	○	○	○	○	○
Construcción de la tubería (agua, telefonos, electricidad)	●	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●	○	●	○	●	○	○	●	○	○	○	○
Construcción de zanjas anchas (menos de 18 cm de ancho)	●	●	●	●	●																		
Superficie asfáltica y remiados	○	○	○	○	○			●	○												●		
Patbs	○	○	○	○	○	○		●	●	●	●	●	●	●									
Entradas para arcos y aceas	○	○	○	○	○	○		●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	○	●	○	○	○	○
Cruces de ferrocarril	○	○	○	○	○	○		●	●	●	●	●	●	●									
Cancha de tenis y base de campos atléticos													●	●	○	○	●	○	●	●	●	●	●
Lugares de estacionamiento													○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Cimentos para edificios industriales						○								●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Rampas y eslabos de puentes						○				●	●	●	●	●	●		○						
Piedras entrelazadas de pavimento								●	●	●	●	●	●	●									
Hilado de pilotes				●	●																		

● RECOMENDADO ○ RECOMENDADO A VECES

CONCLUSIONES

1. El costo de la compactación dependerá de la clasificación del suelo así como del tipo de máquina y el funcionamiento que ésta presente.
2. El conocimiento de ciertos principios básicos para el mantenimiento de las máquinas es de suma importancia tanto para su buen funcionamiento como para mantener la vida útil de la misma.
3. Los suelos cohesivos son los que más problemas dan por sus características, se debe tomar en cuenta su contenido de humedad para lograr una buena compactación.
4. Los suelos en su estado natural, así como los rellenos sueltos experimentan cambios significativos de volumen cuando son sometidos a la acción de cargas, por lo que la compactación constituye el mecanismo para prevenir asentamientos potenciales de una estructura.

RECOMENDACIONES

1. Para tener una buena compactación de un suelo, hay que tomar en cuenta sus condiciones y características así como las especificaciones del proyecto o lo que revele un estudio de suelos adecuado.
2. Realizar un estudio del suelo para determinar qué tipo de máquina es la más adecuada para optimizar de esta manera el trabajo y los recursos.
3. El mantenimiento de una máquina varía dependiendo del uso que se le dé, por lo que se debe llevar el control de su mantenimiento ya que es importante para su buen funcionamiento.
4. Contar con personal que sea calificado para el trabajo, ya que se puede tener una buena máquina pero si no se sabe utilizar, el costo puede aumentar considerablemente.

BIBLIOGRAFÍA

1. Crespo, Carlos. **Mecánica de suelos y cimentaciones**. 4ta. Ed. Editorial Limusa Noriega, 1999.
2. Dirección General de Caminos, Ministerio de Comunicaciones y Obras Públicas. **Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes**. República de Guatemala, 1975.
3. *Ingersoll – Rand*. Compactación manual de datos. 1979. 66 pp.
4. González Herrarte, Álvaro. La compactación de suelos en áreas reducidas o confinadas. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1981. 63 pp.
5. López Juárez, Víctor Manuel. Compactación superficial de suelos y su control en el campo. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1984. 95 pp.