



Universidad Austral de Chile

**Facultad de Ciencias de la Ingeniería
Escuela de Construcción Civil**

"RENDIMIENTO Y COSTOS EN LA MAQUINARIA DE COMPACTACION"

**Tesis para optar al título de
Constructor Civil**

**Profesor Patrocinante:
Luis Collarte C.
Ingeniero Civil**

**Profesores Asesores:
Sr. Heriberto Vivanco B.
Constructor Civil
Ingeniero Comercial**

**Sr. Hernán Arnés
Ingeniero Civil**

**CRISTIAN ALEJANDRO RUIZ AVILA
2002**

RESUMEN

El propósito de este trabajo es mostrar gráficamente de alguna manera, las decisiones hechas relacionadas con la maquinaria de compactación, en ámbitos tales como la conveniencia de arrendar maquinaria, los factores que afectan el rendimiento, cuál sería la modalidad más económica: compra al contado, con crédito bancario o leasing.

Una completa descripción de la maquinaria, la forma en que compacta el suelo y las ventajas del proceso de compactación también están incluidas en este estudio.

SUMMARY

The purpose of this work is to show graphically to some extent, the decisions made dealing with inversions related to compression machinery, in matters such as the convenience of renting machinery, the factors effecting the performance, which would be the most economic modality: cash purchase, with Bancorp credit or leasing.

A complete description of the machinery, the way it compacts the soil and the advantages of the compression process are included in this study.

Dedicatoria:

No puedo dejar pasar la oportunidad de agradecer a las personas que realmente son quienes han realizado el mayor esfuerzo en estos años de estudio, mi aporte es mínimo comparado con el de ellos, estas personas son mis padres Héctor y Miriam que día a día se sacrificaron en muchos sentidos para que yo pudiera lograr este objetivo y espero poder llegar algún día a poder retribuirlos adecuadamente.

Tampoco puedo olvidar el apoyo que siempre sentí de parte de mis hermanos, abuela y tíos que eran una constante motivación para seguir adelante , y por último quiero agradecer a una persona que si bien ya no está entre nosotros tengo la certeza de que siempre en los momentos difíciles y a cada momento a estado conmigo, mi abuelo Beto.

El Autor

INDICE

Introducción.....	1
<u>CAPITULO I</u>	
LA COMPACTACIÓN DE SUELOS	2
¿Desde cuando se compacta el suelo?	2
Ventajas derivadas de la compactación de suelos.....	4
<u>CAPITULO II</u>	
EL MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN “SUELO”	6
Elementos de la compactación de suelos.....	6
1. Tipo de suelo.....	7
2. Forma y rugosidad de las partículas.....	9
3. Distribución granulométrica por tamaños.....	10
4. Contenido de agua.....	13
5. Energía de compactación.....	13
<u>CAPITULO III</u>	
CONTROL DE LA COMPACTACIÓN DEL SUELO.....	14
Densidad seca y Densidad Proctor.....	14
Determinación del contenido de agua en base a la curva Proctor.....	19
<u>CAPITULO IV</u>	
MÉTODOS PARA LA TOMA DE MUESTRAS Y CONTROL DE COMPACTACION EN OBRA.....	20
Método de sustitución por balón de agua.....	21
Método de equivalente de arena.....	23
Nuevos Métodos (Métodos nucleares)	24
Compactímetros.....	27
El compatester Vibromax.....	29
<u>CAPITULO V</u>	
VIBROAPISONADORES.....	36
Efecto de compactación de un vibroapisonador.....	37
¿Trabajo por impacto o fuerza de impacto?	38
Vibroapisonadores con accionamiento eléctrico.....	39
Aplicaciones con vibroapisonadores.....	40
<u>CAPITULO VI</u>	
PLANCHAS VIBRADORAS	45
Efecto de compactación de una plancha vibradora.....	45
¿Excitador de montaje frontal o central?.....	52
Planchas vibradoras de avance en una sola dirección.....	54

Planchas vibradoras reversibles.....	57
Criterios para aplicaciones con planchas vibradoras	60
Compactación de grandes superficies.....	61
Aplicaciones planchas vibradoras pequeñas.....	63
Vibración de pavimentos adoquinados.....	63
Compactación de asfalto.....	65
<u>CAPITULO VII</u>	
RODILLOS VIBRATORIOS	67
Efecto de compactación y características técnicas de las máquinas.....	69
Rodillo Pata de Cabra.....	75
Rodillo vibratorio doble de conducción manual.....	81
Rodillos para zanjas.....	85
Rodillos vibratorios para trabajos en capas asfálticas.....	88
<u>CAPITULO VIII</u>	
LA SELECCIÓN CORRECTA DE EQUIPOS PARA LA COMPACTACIÓN DE SUELOS	90
Suelos no cohesivos.....	90
Suelos cohesivos.....	91
Aplicaciones típicas para equipos de compactación dinámica.....	93
<u>CAPITULO IX</u>	
LA ECONOMIA Y EL RENDIMIENTO EN LA MAQUINARIA DE COMPACTACIÓN	95
Rendimiento de una plancha vibradora.....	95
Rendimiento de los rodillos de compactación y vibroapisonadores.....	96
Economía por rendimiento.....	97
¿Económico o justiprecio?	103
<u>CAPITULO X</u>	
¿ARRENDAR O COMPRAR MAQUINARIA DE COMPACTACIÓN?.....	106
Conclusiones.....	112
<u>CAPITULO XI</u>	
ESTUDIO FINANCIERO.....	114
Tipos de financiamiento.....	114
Compra al contado.....	116
Compra Vía Leasing.....	118
Compra mediante Crédito Bancario.....	120
<u>ANEXO A</u>	
Recomendaciones generales sobre el trabajo de compactación.....	123

ANEXO B

Informaciones generales sobre el mantenimiento de equipos para la compactación de
suelos.....127

ANEXO C

Plancha vibradoras presentes en el mercado.....132

BIBLIOGRAFÍA.....138

INTRODUCCIÓN

La construcción de senderos, caminos, carreteras, torres, diques y puentes no solo fue una necesidad para el ser humano a partir de los tiempos bíblicos. Los caminos, por ejemplo, ya eran “sagrados” desde los tiempos más primitivos. Es así que, entre las informaciones legadas a la posteridad por los egipcios, ya se menciona el uso de rodillos para la construcción de caminos, otros pueblos menos avanzados hacían uso de esclavos, quienes compactaban – apisonaban – el suelo mediante el uso de sus pies. Por otro lado, los romanos ya fueron mas progresistas, dado que utilizaban rebaños de ovejas y ganado para compactar sus caminos.

No muy en serio, y solo como una presencia secundaria respecto a los grandes rodillos estáticos de compactación, fueron considerados los primeros equipos de compactación mecánicos diseñados y desarrollados en los años 30 del presente siglo. Sin embargo esta opinión generalizada cambiaria rápidamente.

Hoy en día ya no es posible pensar en la preparación y construcción de los fundamentos de un edificio u obra sin pensar automáticamente en una compactación mecánica, conforme a las reglas de arte, del suelo. Equipos de compactación dinámicos, tal como vibroapisonadores, planchas vibradoras o rodillos vibradores pertenecen al equipamiento normal y standard de toda obra.

¿Cuáles son los criterios utilizados para hacer necesarios estos equipos en las obras?

¿Qué es lo que actualmente sucede allí abajo en el suelo?

¿Cuándo se debe aplicar cual tipo de equipo?

¿Cómo calcular el rendimiento de la maquinaria de compactación?

¿Es necesario comprar o mejor arrendar la maquinaria? ¿y hasta que punto?, etc.

Respuestas a todas estas – y muchas otras – preguntas podrán ser encontradas en la presente tesis, que tiene como objetivo principal el tratar la compactación de suelos desde un punto de vista económico .

LA COMPACTACIÓN DE SUELOS

La compactación de suelos – una medida de construcción bien conocida – puede ser observada a diario en diferentes tipos de obras, tales como zanjas para tuberías, cableductos, cimientos de edificios, soportes de puentes, obras viales, aceras, etc. Y en muchísimos otros tipos de obras.

Mediante el empleo de equipos de compactación pequeños, livianos y de manejo manual, o también equipos autopropulsados de hasta varias toneladas de peso, se introduce trabajo(energía) en suelos removidos o de relleno.

El objeto de hacer actuar una fuerza sobre el suelo – formado por componentes sólidos y espacios vacíos(poros) llenos de aire o agua – es el de reagruparlo y consolidarlo con el objeto de reducir a un mínimo los espacios vacíos.

Este proceso de la disminución o minimización de los espacios vacíos por medio de la acción mecánica de las maquinas de compactación es el llamado proceso de compactación. Durante este proceso son mejoradas diferentes características del suelo, con un aumento simultáneo del valor de la densidad del mismo.

¿DESDE CUANDO SE COMPACTA EL SUELO?

La compactación de los mas variados tipos de suelos para cimientos de edificios y vías de comunicación ya era un hecho en la antigüedad. Entonces los métodos empleados eran sumamente primitivos, como por ejemplo el apisonado del suelo mediante el pisar de esclavos. Posteriormente, y después de que ella fuera descubierta, se comenzó a compactar el suelo rodando por encima de él pesadas ruedas de madera o de piedra.

Mientras que hoy en día las redes de rutas y carreteras son utilizadas para el turismo y el intercambio de mercaderías y bienes, en el pasado fueron principalmente

las intenciones belicosas, y los necesarios rápidos movimientos de tropas, los factores determinantes para la construcción de las obras viales y de comunicación.

Durante el apogeo del imperio romano y bajo el mando de Julio Cesar, se procedió a construir aprox. 70.000 Km de calles; en comparación existían en el año 1990 aprox. 82.000 Km en los Estados Unidos de Norteamérica. La construcción de calles, un trabajo artesanal de alto nivel, se basaba ya en aquellos tiempos(y esto es valido hasta el día de hoy) en la noción de que una calle era solo tan buena como lo era el fundamento sobre la cual descansaba.

Es así que, antes de dejar colocar las piedras labradas a mano, los constructores romanos, hacían compactar(apisonar) el subsuelo de los futuros caminos por medio de la acción de la gran presión superficial provocada por las pequeñas patas de grandes rebaños de lanares y manadas de vacunos.

Aun hoy día se encuentran restos de estos caminos en Europa, construidos hace aproximadamente 2000 años bajo increíbles dificultades y con métodos sumamente primitivos en relación a los empleados en la actualidad.

Si bien ya en la literatura de los años 1725 se encuentran referencias a un rodillo, tan solo en el siglo XX se desarrolla la técnica de compactación de suelos en combinación con la vibración, debido esto en parte a las, cada vez mas, elevadas exigencias en la construcción y en parte al avance de la tecnología industrial. Esto significa que, adicionalmente a la compactación estática generada por el peso propio de la maquina, tal como era el caso del ya histórico rodillo a vapor, ahora también actuarían fuerzas dinámicas para alcanzar la compactación requerida de los suelos. Tan solo por medio de la vibración puede obtenerse una elevada densidad de los estratos, y paralelamente, una mayor capacidad de carga del suelo.

VENTAJAS DERIVADAS DE LA COMPACTACIÓN DE SUELOS

Casi todas las estructuras construidas por el hombre descansan sobre uno u otro tipo de suelo. En general, durante la construcción de una estructura(un edificio), el suelo natural es perturbado por ejemplo por operaciones de desmonte, excavación o aplanado. Durante el transcurso de estos trabajos el aire penetra dentro del suelo, aumentando el volumen del mismo con la consecuente reducción del peso por unidad cúbica(densidad).

El suelo, en su función de subsuelo, fundamento o infraestructura para, por ejemplo calles, estacionamientos, pisos, etc. Como también como sub-base o relleno en el caso de cimientos y construcciones, no solo deberá ser colocado en capas horizontales, sino que también deberá ser compactado mecánicamente. En general, tanto los suelos finos como también los suelos de partículas de mayor tamaño, alcanzan una mayor densidad seca a la que tenían en su estado natural.

Gracias a este proceso de compactación, es decir, al mayor grado de densidad, se dan las siguientes ventajas.

1. **Aumenta la capacidad para soportar cargas.** Las inclusiones de agua y aire en el suelo conducen a un debilitamiento del mismo y disminuyen su capacidad para soportar cargas. Con la compactación artificial del suelo aumenta la densidad del mismo, con la consecuente disminución del porcentaje de espacios porosos(volumen de los poros). Debido a ello se obtiene una mejor distribución de fuerzas dentro de la estructura de los granos, con el consiguiente aumento de la resistencia al corte y una mayor capacidad de carga del suelo.
2. **Mayor estabilidad.** Al construirse un edificio sobre un suelo compactado en forma irregular o desigual – o también simplemente sin compactar, el suelo se asienta debido a la carga estática y el edificio se encontrara expuesto a fuerzas de deformación. Al existir un asentamiento mayor de un solo lado del

edificio o en una esquina, causado por ejemplo por una compactación desigual, aparecerán grietas o se producirá una destrucción total del edificio.

3. **Disminución de la contracción del suelo.** Al haber inclusiones de aire, el agua podrá penetrar con facilidad dentro del suelo y llenar estos espacios vacíos. Consecuentemente, durante épocas de lluvia, el suelo aumenta su volumen y vuelve a contraerse durante la estación seca.
4. **Disminución de la permeabilidad.** La permeabilidad de un suelo se define por medio del factor de permeabilidad. Este depende esencialmente de la distribución granulométrica del suelo y de su densidad(es decir, del porcentaje de espacios vacíos). Un suelo bien compactado impide casi totalmente o en buena parte el paso del agua. De esta forma es posible controlar con cierta facilidad el volumen de agua en un suelo o el drenaje del mismo.
5. **Disminución del asentamiento.** Cuando el agua se congela tiende a expandirse, su volumen aumenta. Este cambio de estado del agua frecuentemente es la causa de la formación de grietas en los pavimentos, placas base o paredes.

En resumen, la compactación debe realizarse cada vez que se mueva y trastorne el suelo. Buena compactación significa un suelo bien compactado, sin vacíos.

El material de construcción “suelo”

Hasta el momento se ha hablado del material suelo, sin definir exactamente que es este material.

Desde tiempos inmemorables y aun hoy día la corteza terrestre se encuentra expuesta a la influencia de muchísimos diferentes factores (fuerzas destructivas). Grandes cambios de temperatura, vientos, agua y hielo han conducido y aun conducen a la disgregación y descomposición de masas rocosas, las cuales son llevadas por viento y agua a zonas de menor altura y allí depositadas en forma de suelos residuales. Por lo tanto, el material “suelo” es un material de construcción natural, producido por la naturaleza a través de los tiempos, y que aparece –como no lo es el caso con ningún otro material de construcción- en un sinnúmero de variedades.

ELEMENTOS DE LA COMPACTACIÓN DE SUELOS

Entre el sinnúmero de suelos naturales, de diferentes propiedades físicas que varían de lugar a lugar, solo los suelos minerales (inorgánicos), tales como por ejemplo gravas, gravillas, arenas, son los apropiados para ser utilizados como material de construcción.

Suelos orgánicos, tales como el humus (tierra vegetal, negra), la turba o el carbón, no deberán ser utilizados como material de construcción.

La correcta y adecuada compactación de estos suelos en trabajos de movimientos de tierras o en trabajos de fundamento, sea en su estado natural o en estado perturbado, depende principalmente de

- Del tipo de material a compactar y de su capacidad para ser compactado y
- Del tipo de equipo de compactación a ser empleado.

La capacidad de ser compactado de un suelo depende, entre otros, de los siguientes factores:

- 1. tipo de suelo,
- 2. forma y rugosidad del grano ó partícula.
- 3. distribución granulométrica de los granos.
- 4. Contenido de agua.
- 5. Energía de Compactación.

1. Tipo de suelo

Los suelos pueden ser clasificados en suelos no cohesivos, cohesivos y mixtos:

Suelos no cohesivos (granulares):

Esta mezcla, compuesta por muchas partículas individuales sueltas que en estado seco no se adhieren una a la otra, solo se apoyan entre ellas mismas, son en alto grado permeables. Esto se debe a que entre las partículas individuales existen espacios vacíos relativamente grandes e intercomunicados entre sí.

Los suelos no cohesivos no se ablandan en agua, son en general “a prueba de heladas”, en su mayor parte son permeables y secan rápidamente. Por las razones recién mencionadas se los considera poco sensibles a las inclemencias del tiempo durante su colocación y compactación en trabajos de movimientos de tierra.

En un suelo no cohesivo en estado seco es fácil reconocer, por simple observación, los tamaños de los diferentes granos (partículas) y el correspondiente porcentaje en peso de estos granos (tabla 1).

Grupo	Diámetro (en mm)	Subdivisión
Partículas gruesas	>60.0	Rocas Piedras
	60.0 a 20.0	Grava gruesa
	20.0 a 6.0	Grava media
	6.0 a 2.0	Grava fina
Partículas finas	2.0 a 0.6	Arena gruesa
	0.6 a 0.2	Arena media
	0.2 a 0.06	Arena fina
	0.06 a 0.02	Limo grueso
	0.02 a 0.006	limo medio
	0.006 a 0.002	limo fino
	<0.002	Arcilla

Tabla 1 Medidas de las partículas

La capacidad para soportar cargas o la capacidad de carga de suelos no cohesivos depende de la resistencia al rozamiento entre las partículas individuales. Al aumentar los puntos o superficies de contacto entre los granos individuales del suelo, por medio de un aumento de la cantidad de granos por unidad de volumen (compactación), aumenta la resistencia al rozamiento de los granos y, simultáneamente, mejora la transmisión de fuerza entre los mismos.

Suelos cohesivos:

Los granos individuales, en general con forma de plaquetas, de este tipo de suelo son muy finos, casi harinosos(farináceos), se adhieren firmemente uno al otro y no pueden ser reconocidos individualmente por el ojo humano. Los huecos o espacios vacíos entre los granos son muy pequeños y predominantemente aislados uno del otro (tipo panal de abejas). Debido a su estructura estos suelos muestran poca tendencia a permitir el paso de agua, absorben agua muy lentamente pero también vuelven a entregarla con lentitud.

Al absorber agua los suelos cohesivos tienden a hincharse tornándose simultáneamente plásticos; por otro lado, los suelos cohesivos muestran su mayor grado de estabilidad cuando se encuentran en estado seco.

Los suelos cohesivos tienden a ablandarse en presencia de agua, son susceptibles a la acción de las heladas en general, son relativamente impermeables, secan lentamente y son en general sensibles a las inclemencias del tiempo.

Los suelos cohesivos, con sus pequeños poros entre grano y grano, generalmente llenos de agua. Solo se dejan compactar en forma condicional por medio de la vibración. Esto se debe principalmente a las fuerzas adhesivas naturales (cohesión) entre estas pequeñísimas partículas, las cuales tienden a agruparse formando láminas continuas con inclusiones de agua y/o aire, no permitiendo así una redistribución de los granos o partículas individuales.

El agua de lluvia solo puede penetrar muy lentamente en un suelo cohesivo bien compactado. Es por esta razón que la superficie de cada capa individual debería ser “planchada”, después de los trabajos de compactación, con por ejemplo un pequeño rodillo de tambores lisos, manteniendo una pendiente transversal (hacia afuera) de por lo menos un 6 %.

Una vez que el agua ha penetrado en el suelo cohesivo se torna muy difícil su extracción a corto plazo.

Suelos mixtos (suelos bien graduados):

En la naturaleza la mayoría de los suelos están compuestos por una íntima mezcla de partículas de diferentes tamaños, o sea, una mezcla de granos finos cohesivos como también materiales de tamaño mediano o grueso. Estos tipos de suelos suelen ser llamados suelos mixtos, aunque alguna vez también se los denomina suelos bien graduados.

Su comportamiento en conexión con la capacidad del material a ser compactado, su permeabilidad, su comportamiento frente a inclemencias del tiempo y heladas están en directa relación con el porcentaje de partículas finas en relación a partículas gruesas (porcentaje en peso).

2. Forma y rugosidad de la partícula

La forma y rugosidad (textura) de la partícula están directamente relacionadas con el mineral y tipo de roca como también con el proceso de desgaste de la roca (historia de su erosión) y el camino de transporte natural a zonas más bajas. Un camino de transporte largo en arroyos o ríos o la acción de las olas en las playas pueden conducir a la formación de partículas redondas y pulidas (lisas). Una disgregación (descomposición) de la partícula puede volver a aumentar la rugosidad o textura de la misma.

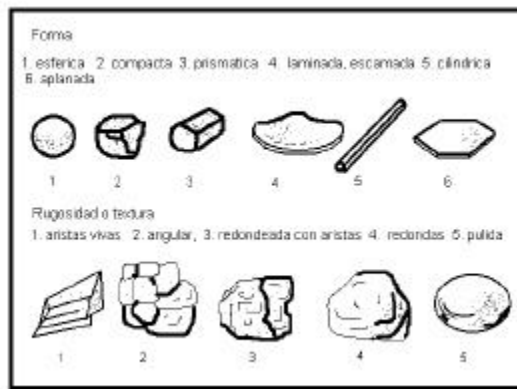


Fig1. Textura de la partícula

Los suelos mixtos con partículas redondas y pulidas son mucho más susceptibles a la compactación que aquellos con partículas individuales de aristas vivas o angulares. Por otro lado, al comparar dos suelos con igual grado de compactación, la capacidad de carga de un suelo compuesto de gravilla y grava o piedra partida con granos individuales angulares y de aristas vivas en fin con alto grado de rugosidad, es mucho más alta que el de un suelo compuesto por arena y gravillas de textura lisa.

3. Distribución granulométrica por tamaños.

En trabajos de fundaciones y movimientos de tierra es de suma importancia conocer la distribución granulométrica, es decir, diámetros y porcentaje en peso de cada tamaño de partículas presente en el suelo natural que esta compuesto en sí por una infinidad de diferentes partículas.

Se extrae una muestra de la tierra a ser utilizada y compactada en capas en la construcción de la obra. Esta muestra es analizada de acuerdo a normas establecidas en un laboratorio de mecánica de suelos para determinar la composición cuantitativa (proporción en peso) de las partículas que componen el material de construcción suelo.

Las partículas de la muestra son separadas en grupos de granos por medio de un proceso de tamizado con tamices de aperturas cuadradas y de mallas con, por ej. tamaños de 63 mm, 2 mm y 0.063 mm entre otros. Para aquella porción de la

muestra con diámetro menor o igual a 0.063 mm(en otras palabras, partículas finas) no es posible determinar el diámetro de los granos por medio del tamizado. En este caso se procede a un análisis por sedimentación, en el cual una parte de la muestra es disuelta en agua destilada. La medida de las partículas se determina en función de la velocidad de descenso de las mismas en el medio agua.

Se toma nota del peso de cada una de las partes de la muestra retenidas en los diferentes tamices, inclusive la fracción determinada mediante el análisis por sedimentación, y luego se calcula su valor porcentual en base al peso total de la muestra analizada.

Los resultados de este análisis son luego representados en forma gráfica, obteniéndose con ello una curva de distribución granulométrica (véase tabla 2).

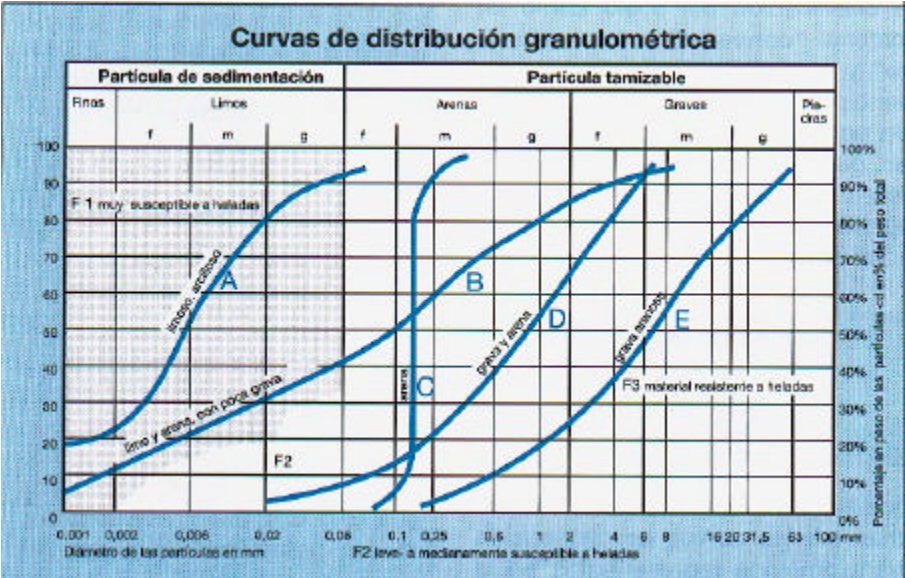


Tabla 2 Curvas de distribución granulométrica

Con esta “acta personal” de la muestra tomada del suelo a incorporar en la obra, el ingeniero o el personal técnico se encuentran en posición de poder dar informaciones detalladas sobre el material de construcción suelo. El porcentaje en peso de las partículas finas es decisivo para la clasificación del suelo como un material cohesivo o no cohesivo y con ello determinante de las propiedades del suelo.

Un porcentaje en peso del 15 % de las partículas con diámetro igual o menor a 0.063 mm define el limite aproximado entre suelos “cohesivos” y “no cohesivos”.

Dos ejemplos típicos a tal efecto podrían ser las curvas de distribución granulométrica representadas en la tabla 2:

- Curva A – suelo cohesivo, arcilloso.
- Curva B – limo, con algo de grava.

La compactibilidad de un suelo esta en relación directa a su distribución granulométrica.

Suelos con un diámetro de grano casi consistentemente igual o con un rango muy limitado en el tamaño de las partículas, son denominados de graduación angosta (uniforme) mientras que aquellos con granos muy diferentes, como por ejemplo una arena con grava y levemente arcillosa(curva D) se clasifican como bien graduados (de graduación amplia).

Es importante recordar que suelos mixtos de distribución granulométrica pobre, solo se dejan compactar con dificultad o simplemente no se dejan compactar. Suelos bien graduados se dejan compactar óptimamente, dado que las partículas pequeñas están suficientemente bien representadas como para llenar los espacios vacíos entre los granos de mayor tamaño durante la compactación por medio de vibración o la transmisión de golpes al suelo. Por consiguiente es posible arribar a una estructura más densa, una estratificación mas alta, y consecuentemente a una mayor capacidad de carga del suelo.

A partir de la curva de distribución granulométrica el técnico puede determinar otras informaciones tales como:

- El comportamiento del suelo frente a heladas;
- La permeabilidad del suelo(importante en la construcción de presas);
- Las propiedades filtrantes del suelo.

4. Contenido de agua

El contenido de agua de un suelo es de suma importancia y determinante en la compactación del mismo. El agua tiende a distribuirse en forma de una película muy fina alrededor de las partículas individuales, disminuyendo simultáneamente la fricción entre las partículas. En otras palabras, al agua actúa como un lubricante, facilitando la predistribución de las partículas individuales durante la compactación. El contenido natural de agua de los suelos varia ampliamente y es muy diferente según el tipo de suelo a considerar.

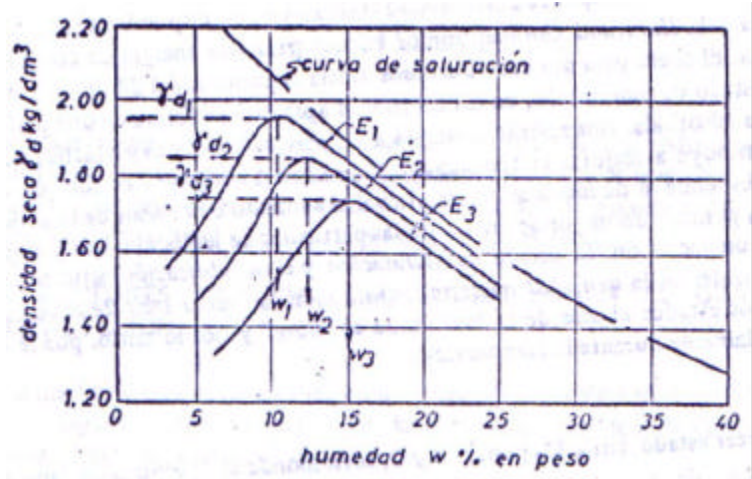
El contenido natural de agua de una muestra de suelo se expresa como la relación (en %) entre la masa natural de agua presente en el suelo y la masa de suelo seco.

5. Energía de compactación

Para estudiar la influencia del esfuerzo de compactación se han desarrollado las relaciones humedad – densidad, para diferentes esfuerzos de compactación, obteniéndose la familia de curvas que se señala en la figura a continuación.

Se puede observar que a mayor energía de compactación aplicada se lograra una mayor densidad máxima, y una correspondiente menor humedad óptima.

Una conclusión practica de importancia es el hecho de que un suelo con exceso de agua no podrá alcanzar una determinada densidad aun cuando se aumente la energía de compactación aplicada, ya que siempre estará limitado por la línea de saturación.



E: energía de compactación
 $E_1 > E_2 > E_3$
 γ_d : densidad máxima
 $\gamma_{d1} > \gamma_{d2} > \gamma_{d3}$
 w : humedad óptima
 $w_1 < w_2 < w_3$

Fig. 2 Energía de Compactación

CONTROL DE LA COMPACTACION DEL SUELO

El objetivo de la compactación de un suelo natural, perturbado o removido, es reducir a un mínimo los espacios vacíos – llenos de aire o agua – tal como ya fuera descrito en los capítulos anteriores.

Gracias al aumento de la densidad del suelo es posible alcanzar un incremento de la capacidad soportante y una menor tendencia a la deformación del suelo, conjuntamente con una disminución de la permeabilidad del mismo. Paralelamente se reduce el peligro de que suelos cohesivos o semicohesivos absorban agua y, por ende, aumenten su volumen. Por lo tanto es posible evitar asentamientos posteriores y posibles daños consecuentes en general.

Por las razones recién mencionadas, el control y la verificación de la compactación del material suelo alcanzada en la obra es de suma importancia. Los ensayos, los cuales en general solo son efectuados por personal capacitado y cuyos resultados son analizados por técnicos o ingenieros, son decisivos para la evaluación de los trabajos de compactación efectuados.

Es así que sin lugar a dudas sea de importancia que cada uno de los empleados en la obra tenga o adquiera ciertos conocimientos básicos sobre la ejecución de este tipo de control.

¿Ahora como es posible saber si se ha logrado y cuando se ha logrado alcanzar el grado de compactación correcto?

Para poder determinar con precisión el grado de compactación de un cierto suelo, restituído y compactado en una cierta obra, es necesario establecer la densidad seca y la densidad Proctor de este material.

DENSIDAD SECA Y DENSIDAD PROCTOR

En los años 30, en busca de un método uniforme de control para laboratorio, y con el fin de

- Evaluar la compactación (densidad) lograda con un cierto tipo de suelo en una obra y
- Definir un valor de referencia para la evaluación del grado de compactación alcanzado

El ciudadano norteamericano R. R. Proctor descubre una íntima relación entre

- El trabajo de compactación al cual fuera sometido un suelo,
- La densidad seca y
- El contenido de agua de este mismo suelo.

Luego de prolongados e intensivos ensayos, Proctor verifica que – partiendo de un trabajo de compactación o trabajo por impacto constante – la densidad seca máxima de un cierto tipo de suelo es alcanzada solo a un determinado valor del contenido de agua del mismo (véase Fig 3).

Este valor máximo de la densidad seca alcanzada para un cierto tipo de suelo se define como “densidad Proctor”, el contenido de agua correspondiente como “contenido óptimo de agua”.

Al mismo tiempo Proctor descubre que el agua contenida dentro de un suelo es de suma importancia para la compactación. Mientras que el suelo comienza a vibrar, debido a la acción del equipo de compactación, las partículas más pequeñas comienzan a migrar en virtud del trabajo introducido con alta frecuencia al suelo – hacia los espacios vacíos llenos de aire o agua. Durante este proceso, el agua contenida en el material suelo actúa, por así decir, en forma de un medio deslizante o lubricante.

Antes de profundizar aún más en el tema, será necesario definir con mayor precisión los términos ya mencionados:

- La densidad seca (D_d) es la masa (peso) de un determinado volumen de una muestra de suelo seca. El estado seco del suelo solo es alcanzado después de

un prolongado secado del material en hornos de laboratorio. En general, la unidad utilizada para definir la densidad seca de un suelo es la t/m^3 (toneladas por metro cúbico).

- El trabajo de compactación, o sea, el trabajo resultante de una serie de impactos sucesivos, es el trabajo aplicado al material suelo por equipos vibratorios, tales como por ejemplo un vibroapisonador, una plancha vibradora un rodillo vibratorio, al impactar estos sobre el suelo.

- El contenido de agua o humedad (ω en %) es la masa (peso) de agua contenida en una determinada muestra de suelo. Esta masa de agua puede ser determinada o medida al secarse una muestra del suelo en un horno de laboratorio. El contenido de agua se expresa en forma de un tanto por ciento en peso (%) de la masa del material suelo seco.

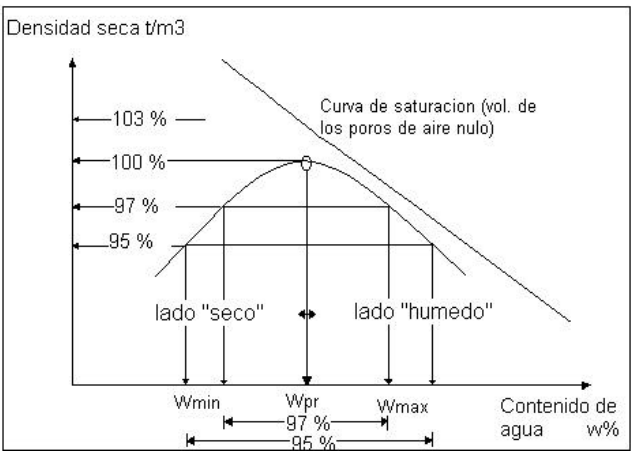


Fig 3. Curva Proctor o curva de relaciones entre humedad y densidad

A partir de ese momento el método de Proctor fue universalmente aceptado en el mundo de la construcción, siendo llamado el método “Ensayo Proctor standard”. Debido a la creciente tendencia a estructuras aun más pesadas y a las demandas cada vez más severas en las especificaciones de compactación, se desarrollo en el correr de los años el “método Proctor modificado”. En general hoy día este último método esta incluido en la mayoría de las Licitaciones Internacionales, siendo parte de las Condiciones especiales del contrato. En ellas se especifican valores de

compactación de suelos que pueden variar, en general, entre un 95 y un 103 % densidad Proctor.

Sin embargo, y antes de poder proceder a efectuar controles de compactación, se deberá determinar un valor de comparación bajo condiciones de ensayo en un Laboratorio de Suelos. Para ello se procede como sigue: en el laboratorio de suelos se colocan pruebas del material a ensayar en forma de capas dentro de un cilindro de acero, el llamado cilindro Proctor. Cada una de las capas colocadas en el cilindro es compactada por medio de un pisón normalizado, el cual se deja caer e impactar sobre el material una determinada cantidad de veces y desde una altura perfectamente especificada.

Este procedimiento deberá ser repetido una cantidad de veces (en general un mínimo de 4 a 5), debiéndose agregar previamente a cada ensayo cantidades diferentes y cada vez mayores de agua al material a ensayar.

El material así compactado es removido del cilindro después de cada ensayo, para ser pesado, secado en el horno durante aproximadamente 24 horas y luego nuevamente pesado.

De este modo se conocen por un lado el peso del material húmedo (m) y por otro el peso del material seco (m_d).

Ahora es posible determinar la cantidad de agua contenida en la muestra del material suelo ($m_w = m - m_d$) y, además, el contenido de agua o humedad (ω en %). Ya que el volumen (V) del cilindro Proctor es conocido a priori, se puede proceder al cálculo de la densidad seca $D_d = m_d/V$ correspondiente a la muestra del material suelo en estudio.

Los pares de valores densidad seca (D_d) y contenido de agua o humedad (ω en %), determinados en cada uno de los ensayos de compactación, deberán ser representados a continuación en un gráfico (véase Fig 3). Al ser conectados los

puntos individuales se obtiene una curva Proctor, curva de relaciones entre humedad y densidad o, simplemente curva de control.

Al estudiar la curva es fácil observar que la densidad seca (D_d) de una muestra con un contenido relativamente bajo de agua (ω en %) no está ubicado bajo ningún concepto cerca del punto máximo de la curva. El “lubricante”, o sea, el agua contenido en la muestra aún es insuficiente.

Por otro lado, y en presencia de un contenido de agua o humedad relativamente alto, se podrá observar que aquí también la densidad seca obtenida se encuentra por debajo del valor máximo posible. La curva desciende cada vez más rápidamente al aumentar el contenido de agua del material. El agua contenida en la muestra no solo actúa como lubricante sino, a su vez, llena también los espacios vacíos y no se deja, como es bien sabido, comprimir.

En el punto más alto de la curva Proctor el material suelo alcanza su máxima densidad seca (D_P), el grado más alto de compactación y a un valor del contenido de agua muy especial. El valor aquí alcanzado se denomina “Densidad Proctor” o también “100 % densidad Proctor” y el contenido de agua correspondiente “contenido óptimo de agua o humedad óptima”.

El valor de la densidad seca (D_d) obtenido al compactar el material de construcción suelo en la obra por medio de equipos de compactación vibratorios podrá ser comparado ahora con la densidad seca máxima, la densidad Proctor (D_P), obtenida en el laboratorio de suelos.

$$\text{Grado de compactación en \%} = \frac{D_d}{D_P} \times 100$$

Esta ecuación nos permite determinar el grado de compactación porcentual del suelo compactado en obra en función de la densidad Proctor obtenida por medio de ensayos en el laboratorio de suelos.

Es importante destacar que se deberán realizar una o más pasadas con los equipos de compactación si el valor del grado de compactación obtenido en obra se

ubica por debajo del valor especificado en las Especificaciones de la Obra. Si, por otro lado, el valor obtenido se ubica por arriba que el especificado, entonces se deberá considerar la posibilidad de disminuir el número de pasadas con el equipo de compactación.

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA EN BASE A LA CURVA

PROCTOR

La curva Proctor, no solo se presta para la determinación de la densidad Proctor de un determinado tipo de suelo. Si las condiciones especiales del contrato requieren, por ejemplo, una densidad seca de 95 % Proctor, es fácil determinar por medio de la curva Proctor dentro de cuales límites se podrá mover el contenido de humedad (en %).

En zonas extremadamente secas o zonas tropicales esta información puede ser de importancia, dado que es posible definir si:

- El contenido natural de agua o la humedad natural del suelo es suficiente, o
- Si resulta necesario agregar agua, es decir, aumentar el contenido de humedad del suelo

para poder lograr la compactación requerida.

Por otro lado, y bajo condiciones diferentes, la curva de relaciones entre la densidad y el contenido de agua, nos informa si resulta necesario secar el material, por ejemplo por medio de trabajos de arado, debido al contenido de agua excesivo del mismo.

METODOS PARA LA TOMA DE MUESTRAS Y CONTROL DE LA COMPACTACIÓN EN LA OBRA

Para el calculo de la densidad seca y del grado de compactación D en %_{Pr} del suelo compactado (tal como ya fuera visto), se hace necesario tomar muestras del suelo compactado en la obra. Este método directo y concluyente es llevado a cabo en general, y por razones de costos, solo en forma puntual en áreas seleccionadas. En general los contratos especifican una muestra por cada tantos metros cuadrados de material compactado en cada capa.

La variedad de métodos existentes para la extracción de muestras de suelos en la obra es amplia. Algunos ejemplos han sido enumerados en la tabla 3.

Tipo de Suelo		métodos de Control	
		método apropiado	método no apropiado
Suelos cohesivos	Sin partículas gruesas	método de extracción de testigos, y todos los demás métodos	Ninguno
	Con partículas gruesas	Todos los métodos sustitutivos	método de extracción de testigos
Suelos no cohesivos	Arenas finas a medianas	método de extracción de testigos	Ninguno
	Mezclas de arena y grava	Método de sustitución por balón de agua, por engrudo, yeso o por agua.	método de extracción de testigos
	Grava pobre en arena	Método de sustitución por balón de agua, por yeso o por agua.	método de extracción de testigos, de sustitución por arena y por bentonita
Piedras y bloques		Excavaciones de ensayo, método de sustitución por agua	Todos los demás métodos

Tabla 3 Selección del método de ensayo para la determinación del volumen de una muestra.

Una muestra del suelo deberá ser extraída de una cierta y determinada posición, en general a ser definida por el inspector de obra, de la capa compactada en la obra para cada uno de los métodos diferentes recomendados en la tabla 3. El volumen de la muestra es conocido a priori o, alternativamente deberá ser determinada en el lugar. Las muestras extraídas deberán ser remitidas al laboratorio de suelos donde se determinarán por medio de mediciones o cálculos los valores definidos a continuación:

- Peso húmedo m
- Peso seco m_d
- Peso del agua $m_w = m - m_d$
- Contenido de agua en % w en %
- Densidad seca D_d
- Densidad Proctor D_{Pr}

Con los últimos valores, D_d y D_{Pr} y con la formula:

$$\text{Grado de compactación } D \text{ en } \%_{Pr} = \frac{D_d}{D_{Pr}} \times 100$$

se hace posible el calculo del grado de compactación en $\%_{Pr}$, pudiéndose consecuentemente evaluar el estado actual de la compactación del suelo en ese punto especifico de la obra.

A continuación describiremos algunos de los métodos más usuales para la extracción de muestras y la determinación volumétrica de los mismos.

METODO DE SUSTITUCIÓN POR BALON DE AGUA

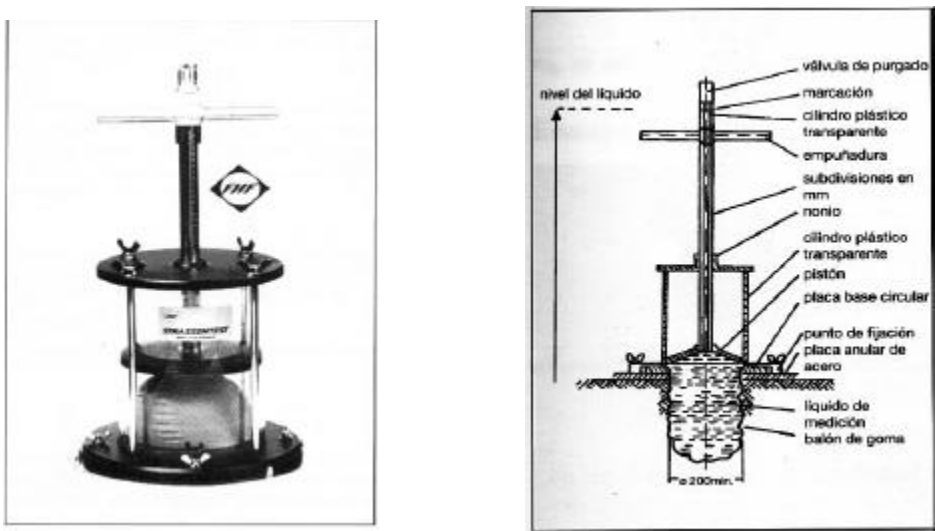


Fig 4. Equipo para el ensayo con el balón de agua

Se deberá aplanar en primer lugar el suelo compactado con una regla metálica. Luego de colocada y fijada la placa base anular, se deberá extraer material suelo ubicado dentro del anillo de la base hasta una profundidad de

aproximadamente 50 mm. El material suelto deberá ser removido por medio de un cepillo de mano o un pincel. Luego se coloca el equipo del balón de agua sobre la placa base anular y, una vez abierta la válvula de purga, ese empuja el pistón hacia abajo por medio de las empuñaduras. Una vez que el globo de agua queda firmemente apretado contra el suelo y que el nivel del líquido dentro de la barra, entre el pistón y las empuñaduras haya ascendido hasta la marcación correspondiente, se efectúa una lectura L_0 en el vernier.

Una vez efectuada la lectura L_0 , se deberá llevar hacia arriba el pistón, inclusive el globo, para luego colocar el equipo dentro de la caja de transporte. El material suelto que se encuentra ubicado dentro de la apertura de la base anular deberá ser excavado con herramientas apropiadas hasta una profundidad equivalente a 1 o 1,5 veces el diámetro interior de la apertura de la placa base. El material así extraído se deposita dentro de un recipiente de almacenamiento con tapa. Los costados de la excavación deberán ser lo más verticales posible y no deberán extenderse por debajo de la placa base. El material suelto adherido a las paredes y en el suelo de la excavación deberá ser removido por medio del pincel y agregado al material dentro del recipiente de almacenamiento, el cual deberá ser cerrado en forma estanca para evitar la entrada de aire o un escape de la humedad.

Una vez concluido este trabajo se vuelve a ubicar el equipo del balón de agua sobre la base para efectuar una nueva medición, tal como ya fuera descrito anteriormente. El balón lleno de agua es empujado nuevamente, de modo firme, hacia abajo, ahora contra las paredes y la base de la excavación. Luego se procede a efectuar una nueva lectura L_1 .

El volumen a determinar de la excavación es equivalente al volumen de líquido desplazado por el pistón entre las dos mediciones:

$$V = (L_1 - L_0) \times F$$

donde F es una constante para el equipo de ensayo por balón de agua y depende de la superficie del pistón.

Errores típicos de manejo y cálculo son:

- Purgado defectuoso del balón de agua
- Presión insuficiente entre el balón de goma y las paredes de la excavación (el nivel del líquido no llega hasta la marcación dentro de la barra)
- Pérdida de material excavado al pasarlo al recipiente de almacenamiento

METODO DE EQUIVALENTE DE ARENA

Luego de fijar la base de acero correspondiente sobre el suelo compactado, se efectúa una excavación similar a la efectuada para el ensayo del balón de agua. Una vez terminada la excavación se coloca sobre la base anular y por encima de la excavación un cono doble, lleno en su parte superior con arena fina de ensayo, calibrada y pesada con exactitud. Después de abrir la válvula la arena fluye hacia abajo hasta llenar completamente la excavación y el cono inferior. Luego se cierra la válvula, se remueve el cono doble y se vuelve a pesar con exactitud. En base a la diferencia entre las dos pesadas se puede determinar por cálculos el volumen de arena introducido dentro de la excavación (ver Fig 5).

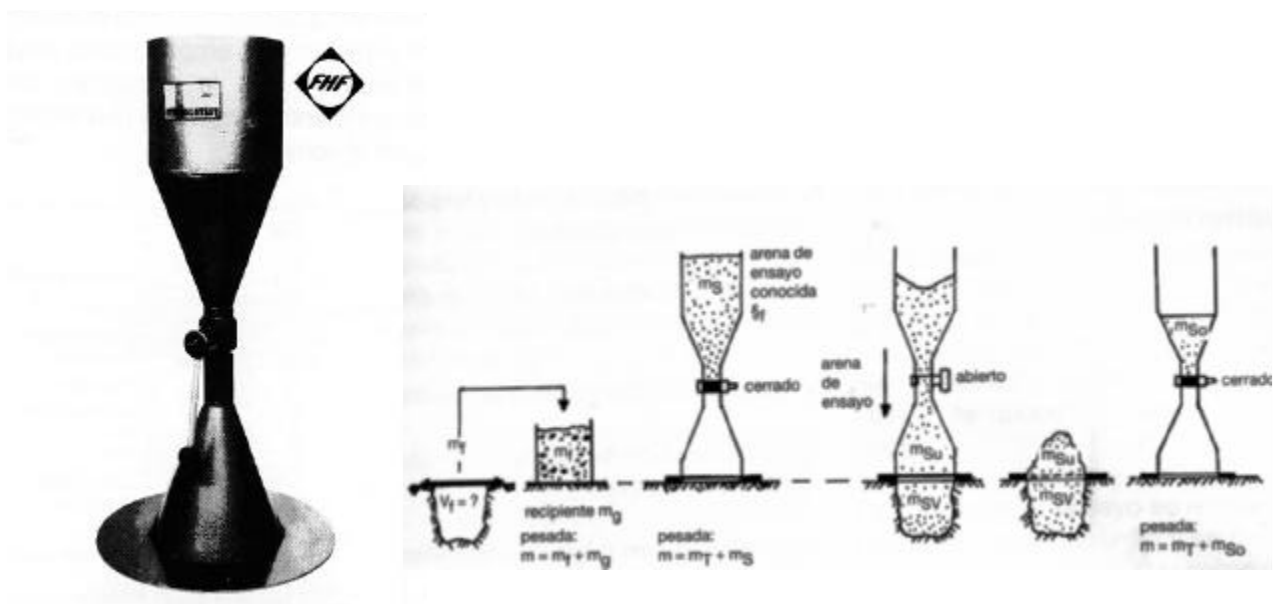


Fig 5. Equipo de ensayo de equivalente de arena

Método de equivalente de arena

Errores típicos de manejo y calculo durante la determinación volumétrica por el método equivalente de arena son:

- Perdida de parte de la muestra
- Uso de arena no calibrada (volumen erróneo)
- Vibraciones en el suelo durante el ensayo (la arena es parcialmente compactada) debido a por ejemplo, el trafico de camiones de transporte de material.

NUEVOS METODOS (METODOS NUCLEARES)

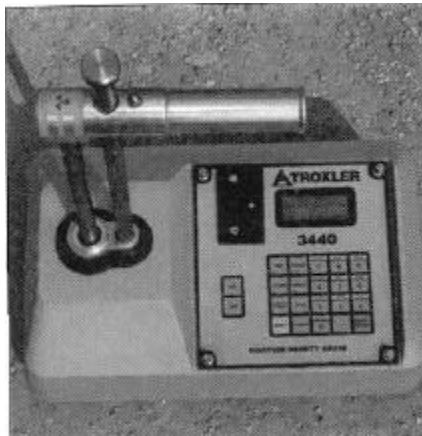


Fig 6. Equipo de ensayo nuclear

INTRODUCCIÓN

Entiéndase el calificativo de nuevos como contraposición al de clásicos, pues en la actualidad ya se llevan realizando mediciones por los métodos que siguen desde hace mas de una década, alcanzando cada vez mas popularidad.

Dentro de estos nuevos métodos incluiremos aquí una serie de procedimientos, cuya base se encuentra en la utilización de isótopos radioactivos.

- **FUNDAMENTOS CIENTIFICOS**

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD

Cuando una radiación gamma, de energía intermedia, choca con un electrón que no este firmemente al núcleo, le comunica parte de su energía, al tiempo que cambia su trayectoria: es el llamado efecto Compton.

La probabilidad de que se produzca un choque aumenta proporcionalmente, a una misma longitud de recorrido, con la densidad del material atravesado.

Por tanto, si detectamos la cantidad de rayos gamma desviados o, lo que es equivalente, los no desviados, podremos mediante simples cálculos obtener la densidad deseada.

Cuando el procedimiento se basa en la detección de los rayos desviados se le denomina *retrodispersión*, llamándose de *atenuación* en caso contrario. En las figuras adjuntas se esquematizan aparatos de ambos métodos.

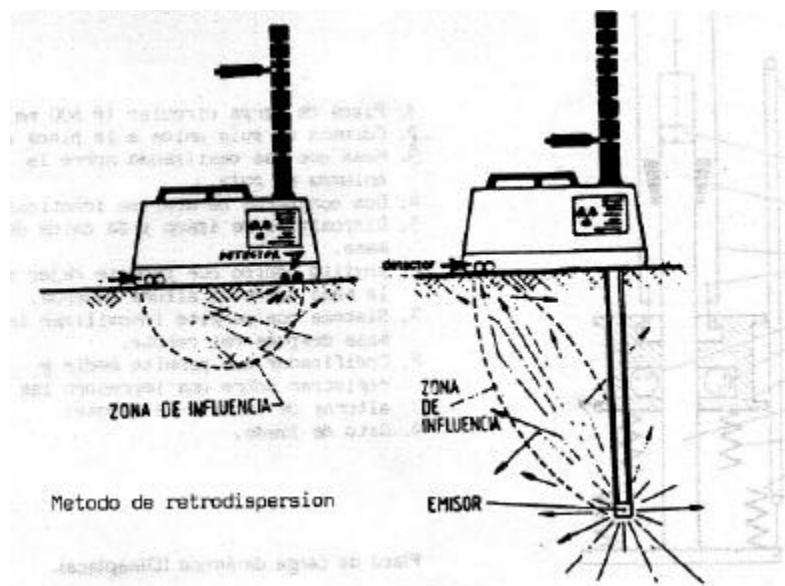


Fig 7. Método de retrodispersión Método de atenuación

Determinación de la densidad mediante isótopos radioactivos

Para el primero de los métodos solo se han desarrollado aparatos comerciales que miden la densidad superficial, por lo que su uso ha quedado muy restringido. Sin embargo, para el segundo, aparte del esquematizado en la figura, que puede medir densidades medias a cualquier profundidad (los aparatos normales tienen un límite de 30 cm debido a la potencia de la fuente emisora), también se han desarrollado aparatos para medición de densidades a una profundidad fija (denominados de doble sonda), lo que ha hecho que su uso se extienda cada vez mas, siendo muy frecuentes en el control de grandes obras, y casi indispensable cuando se hacen

pistas de ensayo para determinar las condiciones favorables de compactación. Este método, por otra parte, es mucho más sensible que el anterior.

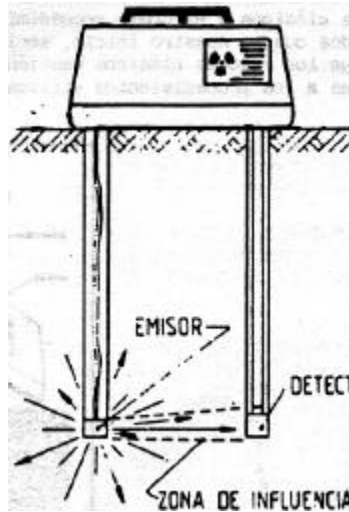


Fig 8. Metodo de la doble sonda gamma

DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD

Una ventaja auxiliar de los densímetros nucleares es que prácticamente todos ellos pueden también determinar la humedad. En efecto, cuando un haz de neutrones rápidos atraviesan un suelo, la pérdida de energía y de los neutrones al chocar con los átomos del suelo es máxima cuando se trata de un átomo de hidrógeno; así pues, el numero de neutrones lentos obtenidos después de haber atravesado el haz el suelo es proporcional a los átomos de hidrógeno presentes y, por tanto, a la cantidad de agua.

- **VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS DENSÍMETROS NUCLEARES**

La mayor ventaja se deriva de la rapidez de ejecución del ensayo y de obtención de los resultados. En los más modernos aparatos, provistos de un microprocesador para los cálculos, puede llevarse a cabo un ensayo completo, con sus resultados, en menos de cinco minutos. Puede, por tanto, ser utilizado como control permanente de la compactación sin necesidad de afectar sensiblemente al ritmo de la obra.

El mayor inconveniente es la utilización de isótopos radioactivos, que, aunque de bajo nivel de radiaciones, están sujetos en la mayoría de los países a normas muy

estrictas de almacenamiento y utilización, siendo necesario que el operador posea un título de manipulador autorizado, aparte de los periódicos controles sobre el nivel de radiación recibido.

En el caso de la medición de humedades, muchos autores han puesto de manifiesto que algunos elementos químicos, como el cloro o algunas tierras raras, puedan afectar a los neutrones de forma similar al hidrógeno, e incluso que el hidrógeno contenido en la materia orgánica que pudiera haber en el suelo falsearía los resultados. No obstante, lo extraordinario de estas circunstancias hacen que el mismo no pierda validez.

En los comienzos de los densímetros nucleares se realizaron numerosas experiencias comparativas entre los métodos clásicos y el nuevo procedimiento, obteniéndose en general muy buenos resultados que, a mi juicio, serían incluso mejores si se hubiesen tenido en cuenta que los métodos clásicos también adolecen de numerosos defectos y problemas inherentes a los procedimientos utilizados.

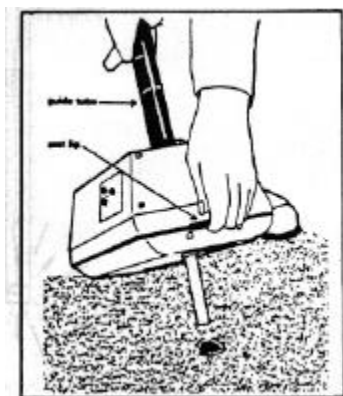
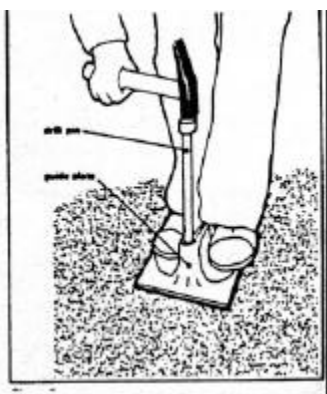


Fig 9. Densímetro nuclear

COMPACTÍMETROS

Al pasar un compactador vibratorio sobre el suelo este le somete, en cada uno de sus ciclos de vibración, a unas solicitaciones que pudieran ser comparables, en cierta medida, a las producidas por las placas de carga dinámicas. Basándonos en este principio es lícito pensar que, al igual que ocurre con las placas de carga, el terreno reacciona ante esta solicitación devolviendo parte de la energía al rodillo,

siendo mayor esta devolución a medida que el terreno es más compacto y, por tanto, con un modulo de elasticidad mas elevado.

Los precursores de los compactímetros alegaron que esta diferente reacción del terreno debía afectar, de alguna manera, al comportamiento del rodillo y trataron de encontrar el parámetro que mejor definiera esta variación.

La mayoría de los compactímetros actualmente desarrollados miden las aceleraciones producidas en alguna de las partes vibratorias de la maquina, reflejándolas mediante indicadores ópticos o acústicos en el cuadro de mando situado frente al conductor.

Las escalas o límites, para los que se considera que el grado de compactación ha sido ya alcanzado, se dan en valores relativos, y exigen la previa realización de pistas de pruebas para cada caso concreto, con el fin de efectuar el tarado del aparato.

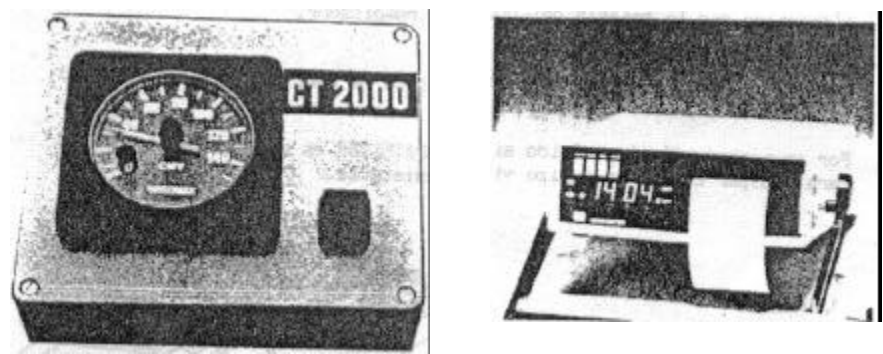
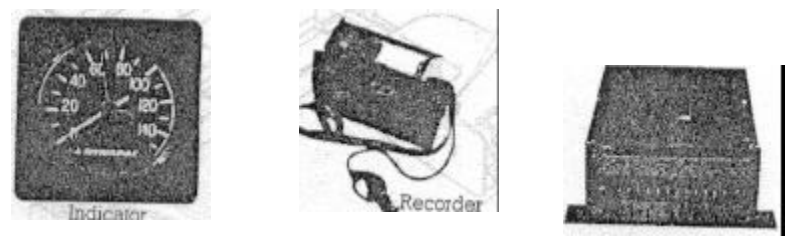


Fig 10. Compatester (Case-Vibromax)



Compactometer (Dynapac)

EL COMPATESTER VIBROMAX

Descripción, función y aplicación

El instrumento Compatester desarrollado e introducido por la casa J. I. Case-Vibromax, es un aparato, diseñado para el control continuo de densidad durante la operación de un rodillo vibratorio.

El Vibromax Compatester se compone de un sensor de vibraciones y de una unidad de indicación que trabaja electrónicamente. A demanda se puede también suministrar un registrador impresor. Se coloca el sensor de vibración rígidamente con una escuadra de hierro sobre una parte que no gire del cilindro (de la llamada “masa vibrante”), y se conecta por el cable de medida con el indicador.

La unidad de indicación será fijada entre los asientos del rodillo autopropulsado o en el tablero de mando del rodillo. El indicador será alimentado por la batería del rodillo.

En la unidad de indicación hay un enchufe para conectar el registrador impresor opcional.

Por su montaje fácil y rápido el Vibromax Compatester es un instrumento ideal para equipar en cualquier equipo vibratorio ya existente.

1 Indicador

2 Registrador (Recorder)

3 Acelerómetro (Impulsor)

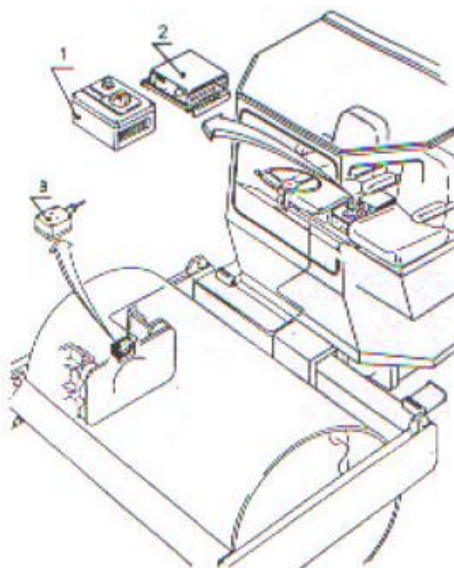


Fig 11. Compatester (Case-Vibromax) instalado en la W-1102 D

GENERALIDADES DE FUNCIONAMIENTO

Durante el proceso de compactación se presentan fuerzas de Impacto o de Golpe entre la parte vibrante y el suelo a compactar.

Se denomina *Golpe* a la acción recíproca de dos cuerpos sólidos que se chocan.

Los golpes se clasifican en *Golpes Elásticos* y *Golpes no Elásticos*.

- En un *Golpe Elástico* la suma de la energía cinética es la misma antes y después del golpe.
 - Energía cinética la energía que pertenece a un cuerpo movido por causa de su movimiento;

$$W_{\text{cin}} = \text{Trabajo de aceleramiento}$$

$$\text{Así, en un golpe elástico es} \quad \sum W_{\text{cin}} \text{ antes} = \sum W_{\text{cin}} \text{ después}$$

- En un *Golpe no elástico* una porción de la energía cinética antes del golpe será transformada en otra clase de energía(Q).

(Q) puede ser:

- Energía de deformación plástica del suelo.
- Energía de inducción.(inducción a vibrar de las partículas del suelo)
- Energía calórica.
- Energía de desconsolidación.
- Energía superficial incrementada del agua intersticial.

$$\text{Así, en un golpe no elástico es} \quad \sum W_{\text{cin}} \text{ antes} = \sum W_{\text{cin}} \text{ después} + (Q)$$

Siendo el objetivo del trabajo de compactación el lograr una alteración permanente de las propiedades del suelo, es claro que los golpes aplicados entre cilindro y suelo deben ser de naturaleza NO elástica.

Las fuerzas de impacto que se presentan son distintas, distintas de un tipo de suelo a otro, de un lugar a otro, de pasada a pasada. Esto por el tipo de suelo, por sus propiedades antes de la compactación, así como por la alteración de estas

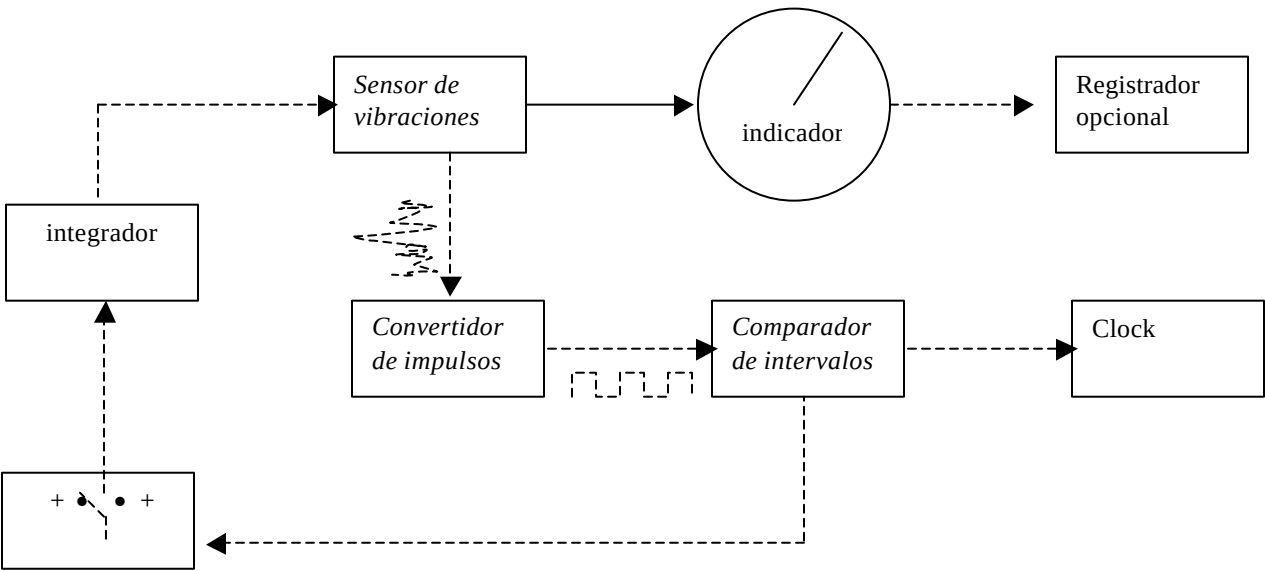
propiedades por causa de la compactación misma. El Vibromax Compatester registra las fuerzas cresta de impacto que se presentan.

PRINCIPIO DE MEDICION

El sensor de vibración del Vibromax Compatester contiene un electroimán que esta regulado de tal manera que solamente produce señales cuando un golpe aplicado excede cierto limite de la fuerza de impacto.

Dicha fuerza excedente debe ocurrir en un determinado periodo. Si en cada uno de los intervalos considerados se produce un acontecimiento con exceso del limite de fuerza predeterminado, se forma un valor que esta mostrado en el indicador.

El flujo de señales se puede esquematizar como sigue:



Señales ocasionales significan en este sistema que hay pocos golpes que exceden el limite ya fijado.

En caso de que dicho limite sea demasiado alto no se producirán señales.

Refiriéndose al proceso de la compactación esto significa lo siguiente:

- ***El suelo se encuentra todavía en estado suelto***

Hay fuerzas cresta de poca intensidad. La producción de las señales ocurre con la “frecuencia” del clock con baja corriente producida por el electroimán. El indicador muestra valores pequeños.

- ***La compactación del suelo incrementa.***

Las fuerzas cresta también aumentan. La corriente producida por el sensor crece y “normaliza” la entrega de señales. Los valores indicados aumentan.

- ***La compactación del suelo esta terminada.***

En las pasadas siguientes se registran fuerzas cresta que en su mayoría son idénticas. La entrega de señales y con esto la indicación permanece casi estables.

EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Generalidades

EL Vibromax Compatester dispone de un botón para activar y desactivar el aparato, y de un instrumento indicador con dos agujas, una blanca y una roja.

La aguja roja, movable por un botón giratorio en el centro del instrumento de indicación, sirve para marcar los valores objetivos o bien fijar valores medidos.

La aguja blanca indica los valores medidos durante las pasadas. Al actuar la indicación esta aguja blanca siempre moverá primero a un valor que se encuentra mas o menos en el centro de la escala. Durante la operación se ajustara a los valores reales medidos.

Se entiende por si solo que valores solamente se indicaran cuando actúa la vibración.

La indicación puede ser influenciada por la velocidad de trabajo (y en escala limitada también por el sentido de dirección de trabajo).

Por esto es recomendable comparar indicaciones solo para velocidades y direcciones iguales de trabajo.

Trabajos típicos del Vibromax Compatester son:

- Determinación de la cantidad optima de las pasadas.
- Controles de la homogeneidad de la compactación.
- Disminución de retrasos en el proceso de compactación causados por desconsolidación en los materiales a compactar.

DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD OPTIMA DE LAS PASADAS

a) Operación con valores objetivos

Se realiza una compactación de ensayo. Con cada pasada del rodillo vibratorio no solo se marcan los valores registrados por el Compatester (con la aguja roja) sino también se verifica la densidad lograda con los métodos de ensayo previstos (test Proctor).

Si en una pasada X se logra la densidad deseada, el valor medido con la aguja blanca sirve como objetivo para la compactación del trecho completo.

Se marca este valor objetivo con la aguja roja del indicador. En las pasadas que siguen el operador observa como la aguja blanca se acerca a la marca objetiva con cada pasada realizada.

Cuando las posiciones de la aguja blanca y el valor objetivo puesto por la roja coinciden de una manera mas o menos estable, tiene su densidad deseada el suelo compactado.

Es claro que en este método de aplicación deben ser mas o menos idénticos los materiales de la compactación de ensayo y los materiales del trecho.

Esta aplicación típica del Vibromax Compatester también se puede denominar:
Realizar una densidad determinada con la cantidad mínima de pasadas.

b) Operación para lograr un valor máximo

El operador observa durante cada pasada el aumento en la indicación de la aguja blanca y marca su posición máxima con la aguja roja.

Llegara el momento en que la aguja blanca no sobrepasara la marca anterior de la roja.

En tal caso la densidad máxima esta lograda y no es necesario realizar mas pasadas en el mismo carril, al contrario: *más pasadas descompactarían los materiales.*

Puede ser que una prueba en el laboratorio muestre que la densidad lograda es mayor que la densidad prescrita. Este efecto puede ser deseado por el contratista porque así puede estar seguro de que cumple con todas las exigencias del contrato.

Esta aplicación del Vibromax Compatester puede denominarse también:
Realizar la densidad máxima con un mínimo de pasadas.

CONTROL DE LA COMPACTACIÓN

En tramos largos se puede usar también el Vibromax Compatester para controlar los resultados de la compactación.

En esta aplicación el operador sigue los distintos carriles de compactación observando la aguja blanca.

Si esta mantiene una posición mas o menos fija durante la pasada de control, esta compactará con regularidad la capa en cuestión.

Cuando se muestran oscilaciones temporarias o permanentes de la aguja blanca a uno o al otro lado de la escala del indicador, puede ser que hayan cambiado propiedades importantes de los suelos usados en las capas.

Puede significar:

- oscilaciones a la gama baja de la escala durante grandes partes de la pasada de control:
 - Ha variado el contenido del agua (en la mayoría de los casos es mas alto)
 - Se ha cambiado la granulometría del suelo

En tales casos suele verificarse el material compactado. Si es posible hay que recompactar.

- oscilaciones bajando en la escala en lugares aislados del tramo:
 - Posibles existencias de tierra vegetal.
 - Drenaje insuficiente de presiones laterales del agua.

En tales casos hay que cambiar los suelos orgánicos o tomar medidas de drenaje.

- oscilaciones subiendo en la escala en lugares aislados del tramo:
 - Piedras o bloques en el carril.
 - Consolidación inicial de un material muy cohesivo.

RECONOCIMIENTO DE DESCONSOLIDACIONES

Puede pasar durante una aplicación, que la marca máxima de la aguja blanca del Vibromax Compatester bajará cuantas más pasadas se realicen.

Dicha bajada puede ser causada por cambios en el material compactado ocasionados por la misma compactación.

Los dos casos más usuales en la práctica son los siguientes:

- Destrucción superficial del esqueleto mineral

Puede reconocerse por las huellas que marca el perfil de las ruedas motrices del rodillo vibratorio. También se forma una capa de harina de piedras (polvo). Este fenómeno suele ocurrir a la décima pasada.

- Desconsolidaciones en capas de material muy cohesivo

La vibración genera fuerzas que favorecen la capilaridad, y el contenido de agua sube de manera considerable, tal que a veces puede ocasionar problemas de tracción.

Dicho segundo caso se puede reconocer a tiempo con el Vibromax Compatester. Cambiando el carril de compactación, se puede dar tiempo al suelo para que se consolide otra vez. Después de la consolidación del suelo el operador puede seguir con la compactación efectiva.

Finalmente, quiero puntualizar que, la misión principal del Vibromax Compatester es la de controlar constantemente los aumentos de la densidad y evitar la destrucción de la compactación conseguida dando sobrepasadas.

Vibroapisonadores

Los vibroapisonadores, también a veces llamados pisones rápidos de carrera larga, son accionados por lo general por motores de gasolina o diesel y en casos de aplicaciones especiales, por motores eléctricos. La fuerza generada por el motor es transmitida a través de un embrague centrífugo a una caja de engranajes, la cual convierte el movimiento de rotación en un movimiento ascendente y descendente, o sea longitudinal oscilante, a través de un accionamiento excéntrico y una biela (Fig 12).

Un pistón guía hace uso de este movimiento longitudinal para comprimir un sistema de resortes. Este sistema de resortes almacena la energía desarrollada por el motor de accionamiento de forma tal que entrega al pisón una velocidad de descenso máxima en el momento en que el pisón mismo toca al suelo. Un instante mas tarde el sistema de resortes es comprimido nuevamente, pero en la dirección opuesta.

La maquina despega del suelo entre 20 y 80 mm. Solo en el caso de un equipo bien diseñado, en el cual se ha logrado una relación de pesos perfecta entre la masa superior e inferior, el vibroapisonador se mueve hacia adelante. Adicionalmente, la posición inclinada del vibroapisonador favorece al movimiento de avance. El suelo es cargado nuevamente, gracias a la caída libre de la maquina y al pisón, que simultáneamente se encuentra acelerando hacia abajo. El vibroapisonador “camina” solo.

1. Punto de izaje central
2. Manillar de guía.
3. Filtro de aire.
4. Filtro de combustible integrado
5. Motor de accionamiento
6. Fza de impacto y altura de salto regulable
7. Sistema de apisonado hermético
8. Fuelle
9. Pisón
10. Base de acero resistente al desgaste

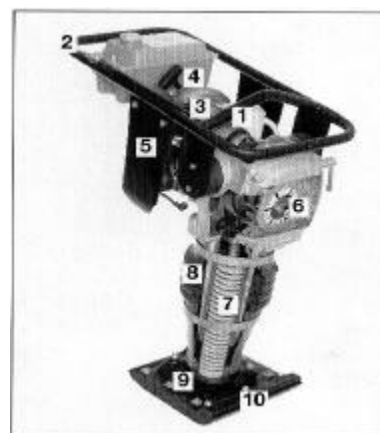


Fig 12. Modelo en corte de un vibroapisonador

EFFECTO DE COMPACTACIÓN DE UN VIBROAPISONADOR

El efecto de compactación de un vibroapisonador depende del número de golpes por minuto, del trabajo de impacto por golpe, la altura de salto y del pisón mismo.

La transferencia de la energía al suelo es llevada a cabo por medio de una rápida sucesión de golpes. La secuencia de 500 a 800 golpes por minuto es tan alta que el material a compactar es mantenido en un movimiento constante. Debido a ello la fricción entre las partículas individuales del suelo es reducida a un mínimo. Con la ayuda adicional de la presión superficial ejercida por el pisón el material se asienta en forma más densa.

Debido a los puntos mencionados anteriormente, y en el caso del pisón rápido de carrera larga, se obtiene una relación extremadamente favorable entre el rendimiento suministrado y el peso del equipo mismo gracias al denominado “efecto de latigazo”. Debido al “sistema oscilante doble”, también llamado sistema de resortes doble, el pisón podrá actuar sobre el material de relleno un tiempo suficientemente largo como para entregar totalmente su energía cinética (energía de movimiento).

La extraordinaria acción de compactación de un vibroapisonador, basada en una combinación de golpes y vibración, da una densidad mucho más elevada al material – después de unas pocas pasadas- que la que sería posible lograr por medio de cualquier otro tipo de equipo de compactación, sin cuestionar aquí la capacidad de compactación de grandes superficies de equipos de mayor envergadura.

Según el contenido de agua (humedad) y la composición granulométrica del material a compactar, es decir forma y rugosidad de la partícula y la distribución granulométrica, es posible después de solo 2 o 3 pasadas alcanzar una densidad

Proctor del 100 % cuando se efectúan trabajos de compactación con un vibroapisonador.

¿TRABAJO POR IMPACTO O FUERZA DE IMPACTO?

En muchos casos los fabricantes detallan en los datos técnicos incluidos en los folletos de los vibroapisonadores el valor de la fuerza de impacto (en kN). El uso de este dato, en combinación con el efecto por golpe, no es apropiado ni significativo. El siguiente ejemplo sirve para clarificar este concepto.

Asumiendo que el máximo trabajo de impacto por golpe efectivamente medido en un vibroapisonador sea de 85 J. En base a la siguiente ley física

$$\text{Trabajo (J)} = \text{Fuerza (N)} \times \text{espacio (m)}$$

se podrá calcular la fuerza aplicada:

$$\text{Fuerza} = \frac{\text{Trabajo (J)}}{\text{Espacio (m)}} = \text{N (Newtons)}$$

En este caso la magnitud “espacio” es equivalente al asentamiento del suelo durante el proceso de compactación.

Asumiendo ahora por un momento que la nueva capa de material de relleno deba ser compactada, se podrá medir un asentamiento efectivo de 20 mm, un valor perfectamente aceptable, al efectuar la primera pasada. La fuerza de impacto resultante será de :

$$\text{Fuerza} = \frac{85 \text{ J}}{0.02 \text{ m}} = 4250 \text{ N} = 0.425 \text{ t}$$

Al pasar nuevamente con un vibroapisonador por encima de la capa bien compactada solo se podrá constatar un asentamiento relativamente pequeño. Con un asentamiento de por ejemplo 1 mm se podrá observar que la fuerza de impacto resultante es enteramente diferente:

$$\text{Fuerza} = \frac{85 \text{ J}}{0,001\text{mm}} = 85,000 \text{ N} = 8.5 \text{ t}$$

Resulta obvio con este ejemplo que la fuerza de impacto transferida al material suelo depende exclusivamente del asentamiento de la capa al ser aplicado un trabajo de impacto por golpe de 85 J.

La fuerza de impacto del equipo vibratorio solo se podrá utilizar como parámetro en conjunto con la medida de asentamiento. Es por esta razón que el parámetro fuerza de impacto por si solo es un valor inapropiado para efectuar comparaciones.

Respecto al rendimiento entregado por un vibroapisonador el único valor inequívoco y comparable deberá ser el valor del trabajo de impacto por golpe, medido en J o mkp.

Pero aquí es donde aparecen los problemas. Solo uno pocos fabricantes detallan el verdadero valor de trabajo de impacto por golpe para sus vibroapisonadores, el único valor del rendimiento efectivamente comparable.

El principal motivo para ello probablemente radique en que no existen standards o normas comunes y uniformes para la medición del trabajo de impacto por golpe para el caso de vibroapisonadores.

VIBROAPISONADORES CON ACCIONAMIENTO ELECTRICO

Si fuera necesario efectuar trabajos de compactación en zanjas profundas de mas de 3 m ó dentro de edificios cerrados , es decir en zonas sin suministro de aire fresco, se deberán evitar los gases de escape provenientes de los motores de combustión para proteger al operador del equipo.

Para este tipo de aplicaciones, pero también en interés de la protección del medio ambiente y de la seguridad del operario, han sido diseñados los vibroapisonadores eléctricos con un peso de servicio de aproximadamente 70 Kg. El ritmo de trabajo, las aplicaciones y el rendimiento de compactación coinciden con aquellas de los vibroapisonadores con motores de combustión interna.

En fin podemos decir que las ventajas derivadas del uso de un vibrapisonador eléctrico son varias: baja emisión de ruido, falta total de gases de escape, rentabilidad y flexibilidad para con un amplio rango de aplicaciones.

APLICACIONES CON VIBROAPISONADORES

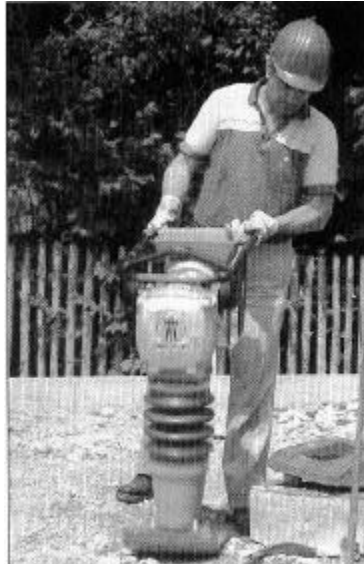


Fig 13. Vibroapisonador de alto rendimiento

Toda y cada esquina y la mayoría de los lugares estrechos de una obra pueden ser perfectamente alcanzados con este equipo ágil y liviano. Rellenos alrededor de cimientos y cerca de muros pueden ser fácilmente compactados.

La facilidad con la cual un vibroapisonador puede ser guiado asegura un trabajar exacto y, al tenerse el cuidado correspondiente, se evita dañar aislaciones o membranas de edificios.

En las obras viales la principal aplicación de los vibroapisonadores se halla en las zonas de los sistemas de tuberías o conductos de drenaje, o también zonas de bordes. Los lechos para tuberías y conductos y las zonas alrededor de estos conductos requieren una compactación intensiva pero especialmente cuidadosa, dado que solo de esta manera es posible evitar daños a los conductos debido a asentamientos posteriores causados por las cargas de tráfico.

Otra área especialmente crítica es el de las zonas alrededor de los colectores de agua, dado que estos también son susceptibles a asentamientos posteriores. Aquí el vibroapisonador demuestra su especial habilidad para negociar las zonas aun más confinadas o difíciles.

La compactación intensiva de aceras, sendas peatonales y calzadas para ciclistas cobra mayor importancia día a día. Una pareja y duradera compactación de la superficie es una condición básica para una sub-base sin asentamientos como lo es la compactación de las zonas de bordes de soporte en el área de las aceras y calzadas.

Muchas veces se da el caso que ni una plancha ni un rodillo pueden alcanzar las zonas de bordes. En estos casos lo obvio es utilizar vibroapisonadores. Gracias al efecto de compactación específico de los mismos, es posible optar por capas mas altas o alternativamente, reducir el numero de pasadas necesarias para alcanzar el porcentaje de compactación requerido.

La colocación de cañerías para servicios o cables subterráneos se lleva a cabo por lo general debajo de las aceras peatonales. Las zanjas deberán ser rellenadas y el material de relleno compactado una vez terminado los trabajos de reparación o después de la colocación de servicios nuevos. Se le deberá dar preferencia a los vibroapisonadores para este tipo de aplicación.

Las capas asfálticas de las calles deberán ser reparadas lo mas rápidamente posible en el caso de daños debidos a roturas por heladas, reparaciones de tuberías de servicios o cables y daños a la superficie de las calles (debidos, por ejemplo a asentamientos.)

Muchas veces estos daños tienen una extensión de solo unos pocos metros cuadrados. El transporte de equipos pesados, tales como por ejemplo un rodillo vibratorio, a la zona de arreglos seria antieconómico. Además el uso de este tipo de

equipo pesado muchas veces no es posible debido a que tapas de pozos para drenajes, vías de tranvía u otros objetos similares interfieren con el trabajo.

Justamente en aplicaciones como las recién mencionadas los vibroapisonadores demuestran ser la herramienta más económica.

Durante la colocación de pavimentos adoquinados, pavimentos autoblocantes, adocretos o adoquines pequeños o medianos, la vibración de los mismos podrá ser fácilmente llevada a cabo con vibroapisonadores de carrera corta aprox. 15 – 20 mm, sin causar daños al material a colocar. Un vibroapisonador de carrera corta también es recomendable para las uniones sin costura entre el pavimento asfáltico existente y el área en el cual se deberán efectuar trabajos de reparaciones o bacheo.

Los vibroapisonadores de carrera larga (60 a 80 mm) desarrollan una intensidad por golpe demasiado alta, en relación al material a vibrar o compactar, como para poderse lograr una superficie perfectamente plana del material asfáltico o para vibrar pavimentos autoblocantes delicados sin dañar a los mismos.

Existe por ejemplo en el mercado un vibroapisonador con 4 posiciones de regulación diferentes de la carrera (amplitud o altura de salto) y, a consecuencia, cuatro diferentes trabajos de impacto. Este tipo de equipo, (Fig 14), fabricado o bien con el usual motor de gasolina de dos tiempos o bien con un motor eléctrico, ofrece toda una serie de ventajas frente al vibroapisonador convencional:

- Aplicación universal con eficiencia en el rendimiento variable.
- Absoluta adaptación al material a compactar gracias al ajuste de la carrera del pisón, al trabajo por impacto y a la secuencia de golpes.
- Ajuste en unos pocos segundos a una de las cuatro carreras del pisón, sin la necesidad de herramientas adicionales:
 - Posición 1 , largo de la carrera de aprox. 15 – 30 mm, para por ejemplo planchado de conexiones en trabajos de bacheo con asfalto o para la colocación de pavimentos adoquinados o autoblocantes.

- Posición 2, largo de la carrera de aprox. 40 – 65 mm, para la compactación precisa y para trabajos de planchado en por ejemplo zonas de bordes o en la compactación alrededor de los colectores de agua. Buenos resultados de compactación en suelos arenosos por ejemplo.
- Posición 3, largo de la carrera de aprox. 60 – 85 mm, para un óptimo rendimiento de compactación de rellenos normales y de acuerdo a la practica de materiales no cohesivos (suelos granulares) a materiales semicohesivos. En esta posición de ajuste es posible alcanzar una buena compactación con gravas, gravillas o piedra partida.
- Posición 4, largo de la carrera de aprox. 70 – 90 mm, para una compactación especialmente buena de materiales cohesivos y también suelos muy húmedos.



Fig 14. Vibroapisonador de carrera variable

Es posible usar un dispositivo de hincado especial en conjunto con el vibroapisonador recién mencionado. Este dispositivo se aplica para el hincado de perfiles, pilotes y postes de los mas variados diámetros como también para el hincado de las barreras de contención en las autopistas.

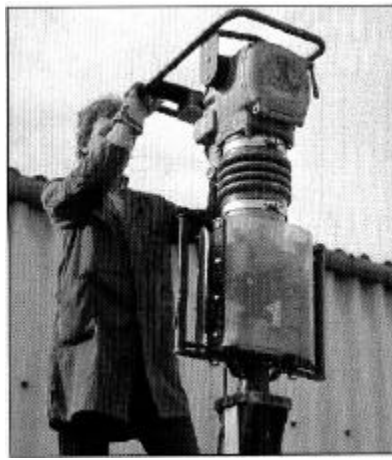


Fig 15. Vibroapisonador con dispositivo de hincado

El pisón mismo es fabricado por lo general en dos materiales diferentes, específicamente madera o material sintético, y equipado posteriormente con una suela de acero resistente al desgaste.

El pisón con un núcleo de material sintético podrá ser utilizado para todo tipo de trabajo, con la excepción de la compactación de asfalto caliente, dado que el material es sensible al calor.

Por otro lado, el pisón con un núcleo de madera es utilizado principalmente en conexión con la compactación de asfalto, siendo también posible su uso para cualquier otro trabajo de compactación.

Los pisones antes mencionados se ofrecen en diferentes anchos de trabajo de entre 100 y 400 mm por algunos fabricantes de vibroapisonadores.

Adicionalmente se ofrecen extensiones, a ser instaladas entre el cilindro de resortes y el pisón, para aplicaciones en zanjas angostas y profundas.

En resumen, hay que prestar mucha atención al seleccionar un vibroapisonador nuevo para determinar que la función y la performance de la maquina cumplan con los requisitos de la obra a efectuar. El fabricante WACKER por ejemplo ofrece 8 diferentes tipos de vibroapisonadores entre las categorías de peso de entre 30 y 90 Kg con los rendimientos correspondientes.

Planchas vibradoras

Las maquinas mas corrientes de conducción manual para la compactación en todo tipo de obras son las planchas vibradoras. En general forman parte del equipo standard perteneciente al grupo aun más pequeño de obreros conectados con la construcción y obras civiles, trabajos de movimientos de tierra o construcción de caminos y carreteras. En particular muestran su fuerte en suelos principalmente del tipo granular hasta inclusive suelos levemente cohesivos. En consecuencia las planchas vibradoras deberían ser utilizadas ante todo para la compactación de arenas, gravas, piedras partidas, pero por otro lado también en suelos levemente cohesivos a semicohesivos pero relativamente secos.

EFFECTO DE COMPACTACIÓN DE LA PLANCHA VIBRADORA

El porcentaje de compactación de un cierto tipo de suelo depende en alto grado de las características técnicas y mecánicas de la plancha vibradora, adicionalmente a la capacidad del suelo a ser compactado, denominada también compactibilidad. Algunas de estas características son:

- La frecuencia del excitador (numero de revoluciones por segundo del eje del excitador).
- La fuerza centrífuga (dependiente del numero de revoluciones del motor recomendado por el fabricante de la plancha).
- La velocidad de avance de la plancha vibradora.
- El tamaño de la placa base con o sin placas adicionales.

El modo de operación de las planchas vibradoras depende de las fuerzas centrífugas generadas por uno o, alternativamente, dos ejes con masas excéntricas (masas fuera del centro de rotación) integradas o incorporadas, ejes que son accionados por medio de un motor de gasolina o diesel por medio de una correa en V y un sistema de poleas. Estas fuerzas dinámicas hacen que, por un lado, la

plancha vibradora avance (o marche en ambas direcciones en algunos tipos de planchas) y, que por otro lado, desarrolle su capacidad de compactación.

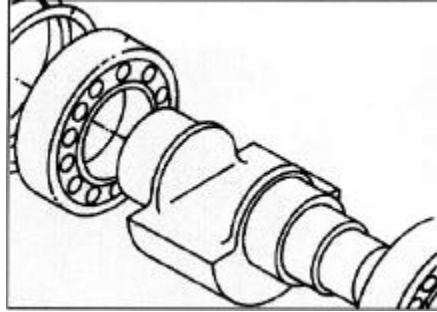


Fig 16. Sistema excitador del tipo de vibraciones circulares

La plancha vibradora es levantada unos pocos milímetros por encima del suelo durante una fracción de segundo con cada rotación del eje del excitador, dado que las fuerzas centrífugas generadas por la o las masas excéntricas en rotación de la plancha vibradora siempre son mayores que el peso propio de la máquina. Durante este periodo de tiempo extremadamente corto, durante el cual la plancha no tiene contacto con el suelo, la misma avanza en una dirección. En la próxima fracción de segundo la placa vuelve a caer sobre el suelo, donde transmite una alta presión superficial de corta duración al material a compactar gracias a la energía potencial acumulada durante la caída de la maquina y a la fuerza centrífuga generada en el excitador.

El efecto de compactación de una plancha vibradora se debe, por lo tanto, a una combinación de energía cinética como a la fuerza centrífuga generada mas las vibraciones forzadas del suelo debido a la frecuencia de impacto de la plancha.

Las vibraciones y los golpes de impacto son transmitidos al suelo por medio de la placa base de la plancha vibradora. Las partículas o granos individuales del suelo comienzan a girar, oscilar y moverse(en forma similar al caso de los vibroapisonadores). Las partículas se separan momentáneamente unas de las otras, perdiendo simultáneamente su efecto de sostén y soporte, giran alrededor de su eje y se trasladan para volver a reposicionarse en una posición más estable. Una

reubicación de las partículas individuales dentro del material suelo toma lugar, las partículas o granos más pequeños llenan los espacios vacíos entre las partículas de mayor tamaño, el suelo se torna más estable lográndose paralelamente una compactación del mismo.

Existe una relación matemática entre el tamaño de la partícula y la frecuencia de oscilación (vibración), llamada relación de vibración. Reducida a su forma más simple la ecuación será

$$D=\frac{k}{n^2}$$

Donde

d= diámetro de la partícula individual en mm
k= constante resumida
n= frecuencia propia (de resonancia) de la partícula individual en 1/min.

Al observar la ecuación es fácil ver que cuanto más alta la oscilación (1/min.) o frecuencia (hz.) introducida al suelo, tanto más pequeña la partícula que reacciona y vibra a esta frecuencia específica.

Oscilaciones	min ⁻¹	6000	3000	2000
Frecuencia	Hz	100	50	33.3
Tamaño de la partícula	mm	10	20	40

Tabla 4. Ejemplos de la relación entre la frecuencia y el diámetro de la partícula.

De esta forma es posible enunciar la siguiente regla: durante el proceso de compactación dinámico, es decir, durante la compactación por medio de vibración, los componentes (partículas) finos girarán, oscilarán y vibrarán cuando se encuentran expuestos a frecuencias (vibraciones) altas mientras que las partículas gruesas oscilaran cuando estén expuestas a frecuencias (vibraciones) mas bajas.

La relación entre la frecuencia de oscilación (vibración) y el diámetro de la partícula quedara clara al ser estudiada la tabla 4 de ella se desprende que para poder lograr una compactación optima es recomendable utilizar planchas vibradoras con una frecuencia alta, ya que las partículas pequeñas reaccionaran mejor en este caso; y se lograra reubicación de las partículas ya que estas migraran a los

espacios vacíos entre las partículas de mayor tamaño, lográndose en consecuencia un aumento de la densidad del material suelo.

¿Cómo se relaciona entonces el efecto de profundidad (fuerza descendente) de una plancha vibradora con la recomendación recién hecha?

La frecuencia de resonancia (frecuencia natural) de un suelo se ubica aproximadamente dentro del rango de los 30 Hz. Al ser inducida al suelo una frecuencia baja por medio de una plancha vibradora, tal como por ejemplo la recién mencionada, teóricamente tenderán a oscilar sobre todo las partículas con un diámetro de aproximadamente 40 mm (ver tabla 6). Debido a la aceleración relativamente baja las demás partículas, o sea las de otros tamaños, apenas mostraran una reacción. Adicionalmente, la transmisión de las oscilaciones de una partícula a la siguiente sería insuficiente, ya que en general las partículas de mayor tamaño se encuentran rodeadas de partículas pequeñas. Justamente estas partículas pequeñas amortiguan las aceleraciones de las partículas más grandes o de mayor tamaño, limitando en consecuencia el efecto de profundidad de la plancha vibradora.

Por otro lado, al seleccionarse una plancha vibradora con una frecuencia del excitador de entre 50 Hz (3000 r.p.m.) y 100 Hz (6000 r.p.m.), reaccionaran bajo resonancia las partículas más pequeñas con un diámetro de entre 10 a 20 mm (ver tabla 6). La intensidad de oscilación (vibración) ha sido incrementada en forma considerable debido a la frecuencia mas alta (revoluciones por segundo del excitador) y la aceleración de todas las partículas con tamaños fuera de la frecuencia de resonancia se hace mayor. La transmisión de las oscilaciones al material suelto de relleno es amplificada, obteniéndose en consecuencia un mayor efecto de profundidad combinado con una estratificación más intensiva de las partículas.

Después de las primeras pasadas con las planchas vibradoras, tal como fuera el caso con los vibroapisonadores, se obtiene un alto grado de compactación del

suelo gracias a la alta frecuencia del excitador y a la presión generada sobre el suelo. En general, tratándose de suelos no cohesivos y bien graduados, es posible obtener una densidad (grado de compactación) del 100 % Proctor después de unas pocas pasadas.

La fuerza centrífuga de la plancha vibradora deberá estar de acuerdo con el tamaño de la máquina y también con los campos de aplicaciones específicos; también aquí vale el principio que el efecto de profundidad aumenta al aumentar la fuerza centrífuga.

Una plancha vibradora con baja fuerza centrífuga, fuerza esta que no concuerda con el peso de la máquina, por naturaleza apenas despegara del suelo. También la energía cinética resultara relativamente pequeña, sumándose a ello la fuerza centrífuga relativamente pobre. Por ende la presión superficial dinámica resulta baja y el efecto de compactación de la plancha vibradora insuficiente.

Por otro lado una fuerza centrífuga demasiado alta no llegara completa al suelo y llevará la maquina a la autodestrucción, ya que existe un límite superior para cada tipo de máquina llamado “fuerza SR” (fuerza dependiente del sistema).

Al comparar dos planchas vibradoras diferentes respecto a su eficiencia para un trabajo de compactación no es la fuerza centrífuga el único punto a considerar. En un ensayo con planchas vibradoras medianas y sobre un suelo con una distribución granulométrica muy específica, se pudo comprobar cuan errónea era esta forma de pensar, ya que las planchas con una fuerza centrífuga superior lograron un valor de compactación inferior al de las planchas con fuerza centrífuga más baja.

La velocidad de avance de una plancha vibradora también juega un papel importante durante el proceso de compactación. Muchos de los fabricantes de las máquinas para la construcción, empresas constructoras y usuarios en las obras prefieren maquinas con una velocidad de avance alta, sin darse cuenta o

simplemente olvidando que la velocidad de avance mayor es alcanzada en desmedro o a costa de la fuerza de compactación a ser inducida al material de relleno.

Consideremos por ejemplo una plancha vibradora que genera, por medio de su excitador, una fuerza centrífuga de 60 kN(6 toneladas) con una velocidad de marcha de avance y retroceso infinitamente variable de aproximadamente 22 m/min(según el tipo de material a compactar). La fuerza centrífuga total generada por las masas excéntricas montadas sobre los dos ejes dentro del excitador se puede dividir en dos fuerzas (descomposición de un vector en dos componentes), la fuerza de avance y las fuerzas de compactación. Con un ángulo de desplazamiento de las masas excéntricas de 45° es fácil calcular, mediante el uso del Teorema de Pitágoras, el valor de tanto la fuerza de avance como también el de la fuerza de compactación. Con este ángulo las fuerzas son iguales y valen 42,4 kN (4.2 toneladas) cada una (ver Fig 17). Haciendo uso de un mecanismo especial es posible variar el ángulo de desplazamiento de las masas excéntricas. Con el nuevo ángulo de desplazamiento, la fuerza de avance ha aumentado a 52 kN mientras que la fuerza de compactación ha disminuido a 30 Kn, tal como se podrá observar en la Fig18.

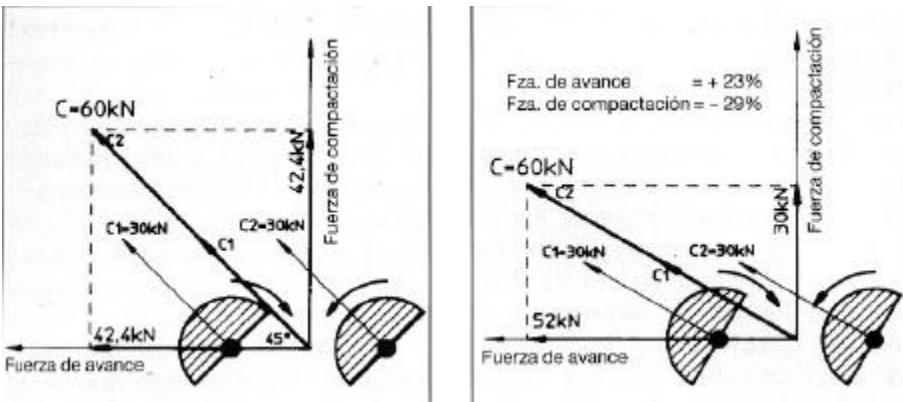


Fig 17. Distribución uniforme de la fuerza centrífuga: 50% avance, 50% compactacion. Fig 18. Velocidad de avance alta, fuerza de Compactacion baja

Visto de otra forma, esto significa que la velocidad de marcha ha aumentado en un 23 % a aproximadamente 27 m/min, mientras que la fuerza de compactación paralelamente ha disminuido en un 29 %. En otras palabras, el aumento de la

velocidad de marcha ha sido logrado a costa de la fuerza de compactación. Una fuerza de compactación reducida o disminuida significa, tal como ya fuera visto antes, una reducción del efecto de profundidad y una compactación insuficiente; y debido a ello se hace necesario un aumento en el número de pasadas con la plancha vibradora, lo que repercute negativamente en los costos de operación de la máquina.

Bajo estas condiciones es posible que se produzcan problemas en la compactación.

En general el operario de la máquina es instruido sobre el número total de pasadas a efectuar con la plancha vibradora más rápida, basado en experiencias previas.

Aparentemente, y gracias a la mayor velocidad de avance de la plancha vibradora, es posible lograr ahorro en el tiempo de uso de la máquina y en los costos del operario mismo. Este ahorro, más bien ficticio, se traduce en realidad en una compactación insuficiente del material suelo y las consecuencias de esta compactación inadecuada saldrán a relucir más adelante cuando, por ejemplo, se produzca un asentamiento posterior en una zanja anteriormente rellenada y deficientemente compactada. Los costos de un arreglo posterior resultarían prohibitivos. Solo se podrán alcanzar ahorros reales al ser utilizada una plancha vibradora de igual fuerza centrífuga pero de velocidad de marcha reducida. La razón para ello es el número reducido de pasadas necesario para alcanzar la densidad Proctor requerida, gracias a una compactación superior y al mayor efecto de profundidad.

El tamaño de la placa base deberá ser escogido teniendo en mente los trabajos a efectuar. Las placas base de algunas planchas vibradoras podrán ser aumentadas en tamaño por medio del uso de placas adicionales de diferentes anchos. Dependiendo del fabricante de las planchas, las placas adicionales o bien forman parte del volumen de suministro original de la plancha vibradora o bien

podrán ser adquiridas a posteriori, a un costo adicional, como un accesorio para la maquina.

Un error típico es creer que el efecto de compactación de una plancha vibradora disminuye en proporción al aumento de la superficie de contacto con el suelo. Este tipo de consideración deberá ser desechado ya que las fuerzas dinámicas – basado en la velocidad de avance algo reducida de la plancha vibradora – actúan sobre el material a compactar por un periodo de tiempo mayor.

Ello significa que, al fin de cuentas, tanto el rendimiento de compactación como también el efecto de profundidad (fuerza descendiente) se mantiene sin variar.

Finalmente podemos decir que como criterio de comparación al tener que optar por una entre dos o más maquinas, no se deberá tomar en cuenta solo el rendimiento de compactación. Para poder efectuar una comparación real se deberán poder ejecutar ensayos de acuerdo a la practica en la obra, para determinar así, in situ, el rendimiento real de compactación de ambas maquinas bajo iguales condiciones de trabajo. Evidentemente los resultados solo son validos para el tipo de suelo utilizado durante el ensayo. Bajo condiciones de suelos y alturas de capas diferentes la situación podrá ser totalmente otra y los datos medidos durante el primer ensayo, en consecuencia, no válidos.

Es necesario recordar también que simplemente no existe una plancha vibradora, diseñada para obtener un óptimo rendimiento de compactación para todo tipo de aplicaciones y además en todo tipo de suelo.

¿EXCITADOR DE MONTAJE FRONTAL O CENTRAL ?

En general las planchas vibradoras están compuestas por dos grupos constructivos:

- La masa superior, la cual incluye un motor de accionamiento, la barra de mando o manillar de guía y, en general, un armazón de protección y
- La placa base con el excitador rígidamente acoplado.

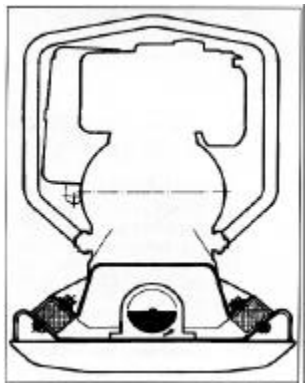


Fig 19. Grupos constructivos de una plancha vibradora

En el pasado los dos grupos de construcción (igualmente denominados masa) de este, también llamado, oscilador de dos masas, estaban conectados entre sí por juegos de fuertes resortes. La técnica moderna permite hoy en día la utilización de topes de caucho-metal, precisamente calculados y cuidadosamente seleccionados. Estos elementos, manufacturados en acero y con cauchos especialmente seleccionados, permiten un montaje perfectamente aislado de la masa superior, el motor instalado sobre ella y de la barra de mando, la cual en general puede ser ajustada en la altura. Además se logra obtener una marcha mucho más quieta de la plancha vibradora, ya que la inercia de la masa superior genera un efecto estabilizante sobre la placa base.

En general el par motor es transmitido al excitador a través de un embrague centrífugo, para facilitar el proceso de arranque y por medio de una correa en V y poleas de diámetros diferentes. El par motor también puede ser transmitido, en algunos casos excepcionales si el tamaño de la maquina lo permite, al excitador por medio de un sistema hidráulico.

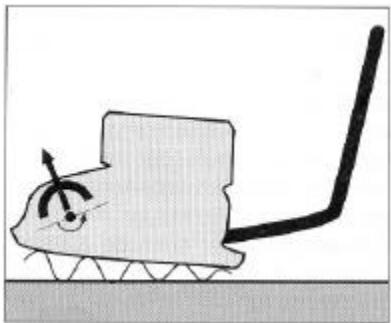


Fig 20. Plancha vibradora con excitador frontal y de avance en una sola dirección

Básicamente existen dos posibilidades diferentes para la ubicación en lo que concierne al excitador:

- Un excitador montado en forma frontal en el caso de planchas vibratoras de avance en una sola dirección, o alternativamente
- Un excitador de montaje central e el caso de planchas vibratoras reversibles, es decir con marcha de avance y retroceso, y en algunas planchas de marcha unidireccional.

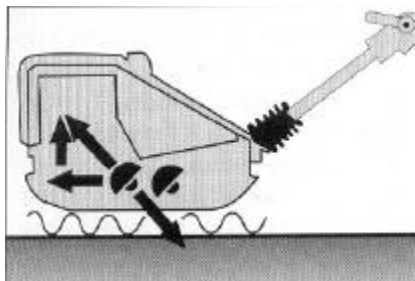


Fig 21. Plancha vibradora con excitador central y de marcha reversible

PLANCHAS VIBRADORAS DE AVANCE EN UNA SOLA DIRECCIÓN

Los excitadores montados al frente de las planchas vibratoras de avance en una sola dirección incorporan en su interior un solo eje. Masas excéntricas exactamente dimensionadas en base a la fuerza centrífuga requerida, se encuentran fijadas al eje o forman parte del mismo (Fig 16). El eje del excitador gira con aproximadamente 3000 a 6000 r.p.m. (50 a 100 Hz), generando de esta forma vibraciones circulares y una fuerza centrífuga correspondiente de aprox. 8 y hasta 30 Kn.

Las planchas vibratoras avanzan por fuerza propia, tal como ya fuera descrito con anterioridad. El vector fuerza centrífuga generado en el excitador, vector este que se divide en una componente de marcha (fuerza de avance) y en una componente de compactación (fuerza de compactación), produce la energía necesaria para la marcha y la compactación. La plancha solo avanza mientras la placa base se encuentra suspendida en el aire por encima del suelo. La componente de marcha en la dirección opuesta(retroceso) es anulada por el alto grado de fricción

entre la parte inferior de la placa base y el suelo, un avance en la dirección opuesta (retroceso) se torna imposible.



Fig 22. Plancha vibradora de avance en una sola dirección

Con cada rotación del eje montado dentro del excitador, la plancha lleva a cabo un movimiento ascendente y otro descendente. Durante el movimiento descendente la fuerza centrífuga esta dirigida (hasta lograr su valor máximo) hacia abajo en dirección al material a compactar, las partículas individuales comienzan a vibrar, lográndose simultáneamente una alta presión superficial sobre el material.

Durante este mismo proceso y gracias al excitador montado al frente de la placa, la plancha vibradora es impulsada hacia adelante.

El mayor efecto proveniente de la fuerza centrífuga podrá ser ubicado directamente por debajo del excitador frontal. Aquí la amplitud, también llamada a veces altura de salto o recorrido, también tiene su expresión máxima pudiéndose de esta forma superar con facilidad las irregularidades o accidentes del material de relleno. La parte trasera de la plancha vibradora es arrastrada, la amplitud de la misma tiene un valor mínimo aquí y el material de relleno sufre un proceso de alisamiento (planchado).

Existe la posibilidad de reducir la velocidad de avance de la plancha vibradora por medio de una reducción del numero de revoluciones del motor pero con la correspondiente perdida de fuerza centrífuga o, alternativamente, mediante un reajuste de las masas excéntricas dentro del excitador.

Dentro de la amplia oferta de planchas vibradoras de avance en una sola dirección existen planchas manufacturadas por uno o dos fabricantes que permiten un ajuste de la fuerza centrífuga dentro del sistema del excitador.

Esta clase excepcional de equipos de compactación permite seleccionar de acuerdo a las necesidades del momento el valor de la fuerza centrífuga entre por ejemplo 8 o alternatively 15 kn, 10 o alternatively 20 kn o aun, un caso especial dentro del mundo de este tipo de maquinas, una plancha vibradora con una fuerza centrífuga infinitamente variable desde 0 hasta 30 kn. Esta clase de planchas se presta idealmente para una gran variedad de aplicaciones, diferentes tipos de suelos, trabajos con asfalto o aún la vibración de pavimentos adoquinados o placas de hormigón autoblocantess, adocretos y otros trabajos similares.

Esto significa, en el caso de las tareas diarias a llevar a cabo en ingeniería y también para la compactación de suelos cohesivos, que se podrán aprovechar la plena fuerza centrífuga y la amplitud, generadas por el excitador de la máquina. Por otro lado, y en el caso de que sea necesario para la compactación de asfaltos o la colocación de pavimentos, el trabajo podrá ser llevado a cabo con fuerza centrífuga y amplitud reducida, pero manteniendo constante siempre la frecuencia.

Finalmente podemos decir que las planchas vibradoras con una sola dirección de avance ofrecen ventajas tales como:

- Alta velocidad de avance
- Excelente capacidad de ascenso
- Insensibilidad hacia las irregularidades del terreno
- Eficiencia en el aplanado o alisado del material a compactar
- Baja altura del equipo gracias al excitador frontal
- Bajo centro de gravedad
- Alto grado de estabilidad.

PLANCHAS VIBRADORAS REVERSIBLES

En el caso de las planchas vibradoras reversibles, y al contrario de lo que es en el caso de las planchas vibradoras de avance en una sola dirección, el excitador se encuentra ubicado en el centro o levemente a un costado de la superficie del centro de gravedad de las masas de la placa base. Esto conduce a un desplazamiento vertical uniforme de toda la placa base al desprenderse la misma del suelo o, en otras palabras, igual grado de amplitud a todo lo largo de la placa base.

Las planchas son accionadas en general por motores diesel y a veces por motores a gasolina. El eje excitador de estas maquinas, con su peso de servicio de alrededor de entre aprox. 100 y 700 kgs, gira aprox. con 3600 (60 hz) y 5400 r.p.m.(90 hz) y la fuerza centrífuga generada varia por lo general entre 20 y 90 kn.

El excitador de este tipo de equipo, accionado por lo general por una correa en V y en casos especiales por un sistema hidráulico, esta equipado con dos ejes excitadores provistos con masas excéntricas. Los ejes giran en forma sincrónica pero en direcciones opuestas. Según el sistema, los excitadores pueden ser de diseño mas o menos complejo o complicado. En el caso de una de las soluciones técnicas más elegantes pero al mismo tiempo más simples (con la menor cantidad de partes o piezas individuales) uno de los ejes es accionado desde afuera por medio de una correa en V mientras que a su vez el segundo eje es accionado por el primero por medio de un engranaje ubicado en el interior del excitador.

Otras soluciones técnicas incluyen por ejemplo un complicado mecanismo diferencial o un sistema con accionamiento a cadena con masas excéntricas ubicadas fuera de la carcasa del excitador. Cada una de las diferentes soluciones técnicas ha sido patentada.



Fig 23. Plancha reversible

La gran ventaja del sistema dual de ejes reside en que el diseño constructivo permite que la fuerza centrífuga resultante (la fuerza total desarrollada) pueda ser inclinada hacia adelante o atrás hasta un cierto ángulo. Solo se generan oscilaciones direccionales (en un solo plano), la dirección de la fuerza de avance (componente de marcha) puede ser cambiada, lográndose de esta forma la posibilidad de variar en forma infinita la velocidad de marcha de la maquina durante el avance o el retroceso.

Esquemáticamente es posible describir este proceso de la siguiente manera: en la Fig 24 A la fuerza centrífuga direccional resultante (suma vectorial de las dos fuerzas centrífugas independientes) esta dirigida hacia el suelo, en B las dos fuerzas se cancelan (vector nulo) y en C la fuerza centrífuga resultante actúa sobre la masa de la plancha vibradora, levantándola del suelo y llevándola a avanzar en una dirección. Este proceso se repite entre 40 y 100 veces por segundo (40 a 100 hz), en función de la frecuencia del excitador.

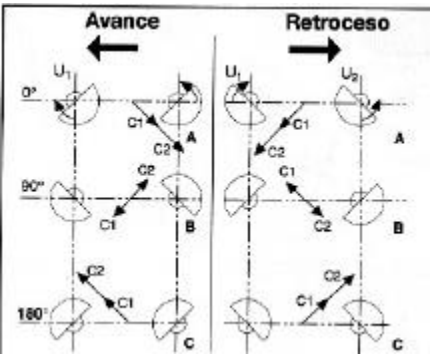


Fig 24. Marcha de avance y Marcha de retroceso

Observando la fig anterior se podrá constatar que la dirección de giro de los ejes con sus masas excéntricas sigue siendo la misma (no ha habido cambio alguno), solo que la fuerza centrífuga resultante, debido a un cambio en la ubicación de las masas excéntricas, ha cambiado de dirección. Este cambio de posición podrá ser llevado a cabo en forma infinitamente variable. Aquí también las fuerzas centrífugas están dirigidas en dirección al suelo en A ; en B las fuerzas se anulan mutuamente y en C inducen la marcha de retroceso de la plancha vibradora.

En la posición intermedia entre la marcha de avance y retroceso la fuerza resultante de las fuerzas centrífugas individuales apuntará solo en la dirección vertical. La componente de marcha tendrá continuamente un valor nulo (las fuerzas generadas por las masas excéntricas en la dirección horizontal se anulan mutuamente), la componente de compactación alcanza su valor máximo, la fuerza de compactación y la amplitud alcanzan el mayor valor posible. En este caso se habla de una compactación en el lugar (vibración sin avance).

¿Cómo funciona el cambio de las posiciones relativas de las masas excéntricas una respecto a la otra?

Las masas excéntricas montadas en ambos ejes dentro del excitador son giradas las unas respecto de las otras en una dirección u otra por medio de un husillo de regulación. De este modo se logra un ajuste infinitamente variable desde la velocidad máxima de avance, pasando por la compactación en el lugar hasta la velocidad máxima de retroceso. (encuentro que la descripción del proceso mecánico que hace posible lo anteriormente explicado es objeto de otras ramas de la ingeniería, y escapan al propósito de este trabajo, por lo tanto lo omitiremos).

Las planchas vibradoras reversibles se pueden recomendar especialmente para los casos de compactación de zanjas, sin olvidar por ello su óptima e incondicional utilización para trabajos de compactación de superficies. El molesto viraje o aún un levantar fuera de la zanja después de cada pasada se torna innecesario gracias a la marcha de avance y retroceso de la plancha vibradora durante el proceso de compactación. Entradas y ángulos en zanjas de servicios y pozos para tuberías, como así también trabajos en áreas restringidas de lugar se pueden llevar a cabo con facilidad. Los esfuerzos físicos por lado del operario al trabajar con planchas vibradoras reversibles se reducen notablemente.

De importancia también para el confort del operario y para las condiciones generales del trabajo es la posibilidad de poder ajustar la altura de la barra de mando vibroamortiguada, tal como lo ofrecen algunos fabricantes.

Finalmente las planchas vibradoras con marcha de avance y retroceso ofrecen una serie de ventajas tales como:

- Ajuste preciso e infinitamente variable de la velocidad de marcha y de la dirección de avance
- Controles de mando regulables en la altura
- Entrega de la fuerza centrífuga total al material a compactar durante la compactación en el lugar
- El control de mando simultáneamente actúa como un dispositivo de seguridad durante la marcha de retroceso
- Especialmente aptas para la compactación en lugares restringidos o en aplicaciones complicadas
- Algunos fabricantes ofrecen planchas vibradoras con control remoto a cable o a rayos infrarrojos.

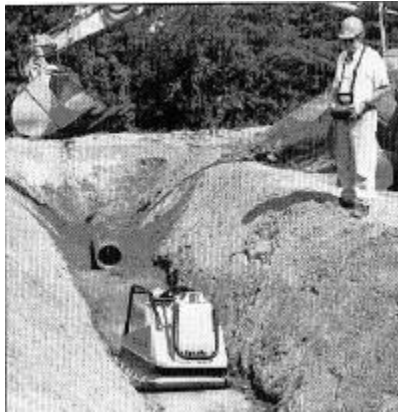


Fig 25. Plancha vibradora con control remoto infrarrojo

CRITERIOS PARA APLICACIONES CON PLANCHAS VIBRADORAS

A menudo las planchas vibradoras son utilizadas para trabajos de compactación en zanjas, ya que son relativamente angostas y básicamente fáciles de operar. Suelos cohesivos son casi o totalmente imposibles de compactar, ya que

la plancha tiende a perder su velocidad de avance, al punto de llegar a la total inmovilidad, luego de lo cual la máquina tendera a enterrarse.

Por otro lado, las planchas vibradoras logran resultados óptimos sobre materiales de relleno secos y sueltos.

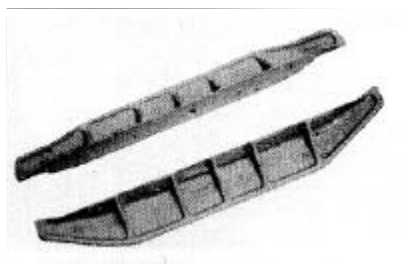
Hay que recordar que la oferta de planchas vibratorias en el mercado es extremadamente amplia y variada. Las fuerzas centrífugas alcanzan desde aproximadamente 8 kn pudiendo llegar hasta valores en exceso de 90 kn. Las máquinas más pequeñas (hasta aprox. 200 kg) encuentran su aplicación principalmente en trabajos de compactación livianos. Algunos ejemplos de estas aplicaciones podrían ser zonas periféricas, zanjas para cables, bases de apoyo de arena, sub-bases , subrasantes o trabajos de bacheo.

Las planchas vibradoras pesadas, cuyo peso excede los 200 kg proveen un alto rendimiento de compactación. No solo son utilizadas para trabajos mayores de compactación de superficies sino que también muestran ser extremadamente eficientes en trabajos de compactación en zanjas. Uno o dos fabricantes incluso ofrecen planchas vibradoras a control remoto (a cable o también a rayos infrarrojos).

COMPACTACION DE GRANDES SUPERFICIES

El tipo de plancha vibradora mas comúnmente utilizado para la compactación de grandes superficies tiene un ancho de trabajo de 50 a 80 cm. Planchas de un ancho menor consumirían demasiado tiempo para trabajos de compactación extensivos. Para lograr una eficiencia aun mayor , muchas de estas planchas permiten la adición de extensiones atornilladas lateralmente, las llamadas placas adicionales, permitiendo de esta forma la compactación adecuada de zanjas de diferentes anchos con un solo tipo de equipo.

Fig 26. Juego de placas adicionales



Al ser efectuados trabajos sin placas adicionales es importante prestar atención que las perforaciones laterales roscadas de la paca base de la plancha vibradora siempre estén protegidos con tornillos del diámetro correspondiente. Estos tornillos, que pueden ser adquiridos como accesorios, evitan que las perforaciones roscadas se tapen con el material de relleno a compactar.

Para trabajos de compactación de materiales de relleno aun más extensivos, tales como por ejemplo caminos o calzadas o también terraplenes, se podrán acoplar entre sí 2 o hasta 3 planchas vibradoras. El rendimiento de compactación (productividad) es aumentada en un 100 o 200 % respectivamente, ahorrando al mismo tiempo en costos de personal.



Fig 27. Planchas vibradoras acopladas

Las planchas vibradoras reversibles con arranque eléctrico del motor y con un mando de control integrado en el manillar ubicado en el cabezal de la barra de guía son especialmente fáciles de manejar para este tipo de aplicaciones especiales. El operario guía sus planchas sin esfuerzo alguno, las planchas acopladas pueden ser maniobradas en cualquier dirección y aun pueden ser giradas en el lugar. Gracias a la regulación extremadamente fina de la velocidad de avance o retroceso, por medio de los manillares con sus mandos de control individuales, es posible superar en forma fácil y sin dificultades hasta las superficies mas accidentadas o también diferencias de altura entre las planchas vibradoras individuales.

Los juegos de acoplamiento son mas o menos fáciles de montar y fijar, según qué fabricante los ofrece . Bajo ningún concepto debería ser necesario, ni admisible, tener que desmontar y alejar el armazón de protección del motor y la maquina de la plancha vibradora, tal como es el caso en uno o dos modelos fabricados en el mercado internacional.

Otro factor para recordar es el suministro por lado del fabricante de un aparejo para grúa con el juego de acople de las planchas, para permitir de esta forma un fácil transporte del equipo.

APLICACIONES PARA PLANCHAS VIBRADORAS PEQUEÑAS

Las planchas vibradoras pequeñas, con un peso de aprox. 100 a 200 kg, encuentran su principal aplicación en zanjas para servicios, zonas marginales, áreas inaccesibles para equipos pesados, áreas confinadas, camadas de arena para pavimentos adoquinados, senderos peatonales y similares.

El fácil manejo, la falta de elementos sobresalientes por encima de la placa base y las medidas reducidas permiten la compactación en superficies de lo más pequeñas, en áreas confinadas y en esquinas, alrededor de sumideros y también a lo largo de cordones y costados de senderos.

No se deberá bajo ningún concepto tratar de compactar material de relleno con capas de mas de 30 cm de espesor y con tamaños de particulazas de mas de 40 mm.

VIBRACIÓN DE PAVIMENTOS ADOQUINADOS

Aún el mejor pavimento adoquinado solo es tan bueno como lo es su sub-base, dependiendo por ello en primer grado de la calidad de compactación de la misma. Es entonces la calidad de la compactación la que determina la capacidad de carga del pavimento. Aun si el relleno de arena hubiese sido compactado antes de la colocación del pavimento adoquinado pueden resultar asentamientos y desigualdades en la superficie debido a cargas. Este tipo de daños puede ser

eliminado casi completamente si el pavimento adoquinado, una vez colocado, es vibrado con ayuda de un equipo vibratorio. Los adoquines o las placas individuales se acomodan y asientan en forma pareja en el lecho de arena gracias a la vibración y una parte de la arena misma comienza a subir entre las juntas o intersticios, mejorando así el efecto autobloqueante entre un adoquín o placa y el siguiente.

Básicamente para este tipo de aplicación se deberían utilizar solo planchas vibratoras con frecuencias elevadas. La plancha vibradora presenta la frecuencia correcta para la vibración de pavimentos adoquinados solo si la misma supera los 65 Hz (aprox. 4000 r.p.m del excitador). No se producen golpes duros e incontrolados, tales como los que ocurren en el caso de planchas vibratoras con frecuencias bajas. Muchas veces la superficie de pavimentos adoquinados o autoblocantes es extremadamente dura, existiendo por ello el peligro de roturas debido a los golpes duros producidos por los golpes de impacto. No habrá que olvidar que recambiar un adoquín, un adocreto o una placa autoblocante significa mucho trabajo.



Fig 28. Vibración de un pavimento adoquinado

Por otro lado, y con una frecuencia alta, el lecho de arena es vibrado en forma intensa y los adoquines son acomodados en forma cuidadosa.

Al vibrar pavimentos adoquinados de cualquier tipo, se debe recordar lo siguiente:

- Las maquinas con un peso de servicio de hasta aprox. 130 kg y una fuerza centrífuga de hasta aprox. 18 kn son suficientes para vibrar pavimentos adoquinados de 60 mm de espesor
- Para pavimentos adoquinados de espesores entre 80 y 100 mm las planchas vibradoras más aptas son aquellas con un peso de servicio de aprox. 170 hasta 200 Kg y con fuerzas centrífugas de por lo menos 20 kn
- Pavimentos adoquinados o autoblocantes con espesores de 100 o más mm podrán ser óptimamente vibrados con planchas vibradoras de envergadura pesando entre 200 a 600 Kg y con una fuerza centrífuga de hasta 70 kn

Los trabajo efectuados manteniendo lo arriba mencionado en mente podrán ser llevados a cabo en forma profesional y económica.

Un accesorio sumamente práctico para el uso en conjunto con planchas vibradoras es la placa deslizante. Esta placa, a disposición para anchos y tipos de planchas de lo mas variadas, se podrá utilizar para la vibración de no solo pavimentos adoquinados o autoblocantes sino que también adocretos, placas de hormigón lavado, placas de hormigón para senderos, etc.

Solo con este accesorio, fabricado de un material sintético especial (generalmente poliuretano) y adaptado al tamaño de la placa base de tanto planchas vibradoras de avance en una sola dirección como también planchas vibradoras reversibles, es posible vibrar pavimentos de todo tipo en forma óptima, cuidadosa y con emisión sonora reducida. El pavimento estará protegido, la placa base protegida contra un desgaste prematuro y el ruido emitido por el trabajo reducido en aprox. 6 a 10 dB. No solo el operario se beneficiara con esta reducción de la emisión sonora sino también aquellas personas presentes en las cercanías de la obra.

COMPACTACION DE ASFALTOS

En forma similar a lo ya visto para el caso de los vibroapisonadores, las planchas vibradoras se prestan en forma excelente para la compactación de mezclas

bituminosas en trabajos de bacheo o en zonas periféricas y para aquellos casos en los cuales no es posible o económico el uso de rodillos vibratorios. También en trabajos de reparaciones o de repasado, trabajos para los cuales simplemente no resulta económico transportar un rodillo, como también daños debidos a heladas o en revestimientos de calzadas las planchas vibradoras encuentran un campo ideal y amplio de aplicaciones.

El peso de la plancha para este tipo de trabajos no debería sobrepasar los 200 kg. La frecuencia de excitación deberá ser mayor de 65 Hz, para lograr tiempos de entrega de energía cortos, ya que no se lograrán superficies asfálticas planas y lisas al utilizarse planchas vibradoras con una alta energía entregada de compactación y, por otro lado, frecuencias bajas. El uso de planchas vibradoras de avance en una sola dirección con fuerzas centrífugas infinitamente variables ha mostrado ser de gran ventaja en este tipo de aplicaciones .

Los sistemas de riego son otra enorme ayuda para los trabajos de compactación de capas asfálticas. El agua forma una película entre la capa base y la capa del material bituminoso, evitando así que el asfalto se pegue a la parte inferior de la placa.

Las panchas vibradoras para uso en capas asfálticas deberán haber sido especialmente diseñadas para este tipo de trabajo. En otras palabras, la placa base deberá estar provista de contornos redondeados y bordes contorneados, para asegurar de esta forma una compactación lisa del asfalto sin dejar huellas, ondulaciones o marcaciones de otro tipo.



Fig 29. Compactación de asfalto

RODILLOS VIBRATORIOS

El último grupo importante de máquinas para la compactación a considerar es el de los rodillos vibratorios. Este tipo de maquinas encuentra su principal área de aplicaciones en el campo de la compactación de grandes superficies de suelos como también en el área de la compactación de superficies asfálticas.

Una que otra vez es posible admirar en museos los antiguos rodillos estáticos (no vibratorios) a vapor, un símbolo de potencia, belleza e ingeniería. En realidad esto rodillos, que lograban compactar el material de relleno por la sola acción de su peso, son las máquinas de compactación mecánica más antiguas, siendo los precursores de los numerosos diseños y modelos existentes hoy en el mercado. El primer rodillo a vapor(una copia de un rodillo tirado por caballos) fue diseñado y construido por un francés llamado Elmoine en el año 1861, siendo utilizado a continuación en Paris. El primer rodillo doble a vapor alemán fue construido en 1878 por la empresa Jun, mientras que por otro lado la empresa Kaelble construyo en el año 1908 el primer rodillo accionado por un motor.

También con los rodillos(al igual que con los vibroapisonadores y las planchas vibradoras) se logra, gracias a la compactación, una reducción de los espacios vacíos mediante el desplazamiento de las inclusiones de aire y agua como asimismo un aumento de la resistencia al corte del suelo.

Si se logra aumentar la capacidad de carga del suelo, se evitarán asentamientos posteriores del material y asimismo se podrá disminuir la permeabilidad y por ende la posible expansión posterior del suelo.

Tan diversas como las aplicaciones para los rodillos son también los materiales a compactar. Estos alcanzan desde gravillas y gravas, arenas y suelos mixtos hasta llegar a los suelos cohesivos(siempre que se trabaje con tambores pata de cabra de distintos tipos) y también mezclas minerales conteniendo bitumen o alquitranes.

Hoy día se diferencia claramente entre:

- Rodillos estáticos, es decir, rodillos que compactan el material por la sola acción de su alto peso propio (presión estática) y por medio de la superficie de contacto de los tambores con el suelo. Este tipo de maquina en general ha sido equipado con uno o dos tambores generalmente lisos o, alternativamente, con varios neumáticos lisos (sin perfil) y a veces con una combinación consistiendo en tambores y neumáticos (rodillos combinados). También los rodillos vibratorios son clasificados como rodillos estáticos cuando son empleados sin hacer funcionar el sistema vibratorio.

La principal área de aplicaciones para rodillos estáticos se debe a su acción de presión y alisamiento en el caso de subestructuras o también en superficies asfálticas.

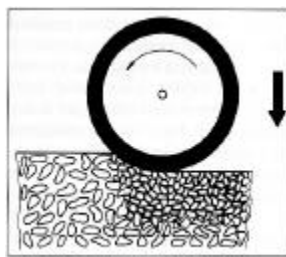


Fig 30. Compactación por peso propio (estática)

- Rodillos vibratorios, los cuales no solo compactan por acción de su gran peso estático sino también, simultáneamente y debido a la vibración, dirigen fuerzas dinámicas dentro del material a compactar resultando de esta forma una compactación más efectiva del material suelo y con una penetración mayor.

Los rodillos vibratorios son fabricados en variedad de tipos: rodillos de conducción manual, rodillos autopropulsados y rodillos remolcables. Se diferencian no solo por el tipo constructivo sino también por su tamaño y el numero de los tambores. Encuentran sus aplicaciones en una variedad de campos y con resultados diferentes según el tipo de material a compactar.

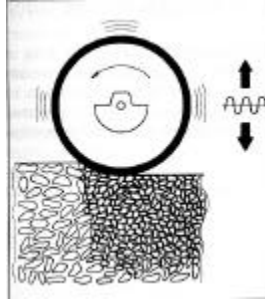


Fig 31. Compactación por vibración (dinámica)

EFFECTO DE COMPACTACION Y CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LAS MAQUINAS

Aquí también, tal como lo fue el caso de las planchas vibradoras, el rendimiento o porcentaje de compactación depende (junto a la capacidad del suelo a ser compactado) esencialmente de las características técnicas del rodillo vibratorio. Algunas de estas características, de las cuales varias están íntimamente relacionadas entre sí, son:

- El peso de servicio del rodillo, distribuido en los tambores individuales
- La fuerza centrífuga dirigida hacia el material suelo por cada uno de los tambores
- La frecuencia del excitador (r.p.m. del eje del excitador)
- La amplitud nominal (un medio del camino de oscilación del tambor)
- La presión lineal (carga) estática de los tambores individuales
- La presión lineal dinámica del tambor o de los tambores vibrantes
- La velocidad de trabajo del rodillo

1. Fuerza centrífuga

La compactación por vibración se basa en el hecho de que el material a ser compactado es obligado a oscilar por medio de una rápida sucesión de fuerzas que actúan sobre el mismo. Tal como también fuera el caso de las planchas vibradoras, la vibración y las fuerzas centrífugas son generadas por medio de masas excéntricas en rotación.

El excitador con la masa en rotación estará ubicado, dependiendo del tipo de rodillo vibratorio:

- En algunos casos en forma central, fuera de los tambores y generalmente fijado al chasis inferior o
- Mas comúnmente dentro del cuerpo del tambor o de los tambores vibrantes, caso en el cual las fuerzas centrífugas son transmitidas directamente al material a compactar.



Fig 32. Generación de la fuerza centrífuga

La fuerza centrífuga C (en kn) esta definida por la geometría (forma), peso y velocidad angular de la masa excéntrica y se calcula de la siguiente forma:

$$C = m \times r \times \omega^2 = m \times r \times \left[\frac{2 \times \pi \times n}{60} \right]^2$$

donde el significado de los términos individuales es:

m = peso de la masa excéntrica (kg)

r = distancia del centro de gravedad al centro de giro de la masa excéntrica.

ω^2 = velocidad angular al cuadrado ($1/\text{sec}^2$)

π = constante (3.14)

n = r.p.m. del eje del excitador (min^{-1})

2. Frecuencia del excitador

La frecuencia (en Hz), es decir, el numero de oscilaciones por segundo de las masas excéntricas en rotación; esta definida por el numero de revoluciones del eje del excitador:

$$\text{Frecuencia (Hz)} = n \text{ (min}^{-1}\text{)} / 60 \text{ (seg)}$$

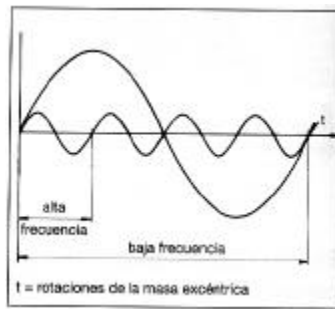


Fig 33. Frecuencia del excitador

Aquí, como también en el caso de las planchas vibratoras, valen las mismas reglas: para materiales de relleno de granulometría esencialmente fina se logra una mejor compactación al aplicar equipos de alta frecuencia mientras que para el caso de materiales con un alto contenido en gravas gruesas se requiere una frecuencia más baja.

En el caso de los rodillos, para alcanzar buenos resultados en la compactación tanto de materiales finos como también gruesos y para ofrecer una gama lo más amplia en las aplicaciones y usos, se deberá hacer un compromiso en lo que respecta a la frecuencia. Las frecuencias de rodillos se mueven por lo general dentro del orden de aproximadamente 40 a 85Hz. A este respecto y dentro de la gama de equipos considerados en este manual, se deberá agregar que hoy día los fabricantes de rodillos, muestran una tendencia hacia las frecuencias más altas.

3. Amplitud nominal

La masa oscilante de la máquina esta separada del resto del rodillo vibratorio por medio de elementos (topes) de caucho-metal. La amplitud teórica (en mm) esta definida por la geometría y el peso de las masas excéntricas como también por el peso de la masa oscilante de la máquina:

$$A = \frac{m \times r}{M}$$

Donde M representa la masa de los elementos vibrantes de la maquina.

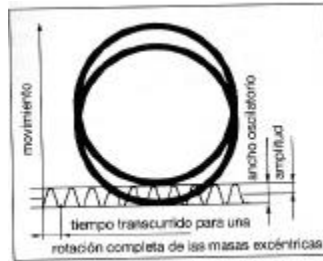


Fig 34. Amplitud y oscilación total

La amplitud real (1/2 de la oscilación total del tambor) del rodillo vibratorio, medido durante aplicaciones diarias, puede desviarse en mayor o menor grado de la amplitud teórica calculada.

Es bueno recordar que la magnitud de la amplitud real.

- Durante la compactación de suelos depende, entre otros; de la influencia de las propiedades del suelo mismo, su capacidad a ser compactado y su contenido de agua (humedad).
- Durante la compactación de asfaltos influyen las propiedades de los áridos minerales y los aglomerantes como también la composición de la mezcla y la temperatura de la misma, y
- Depende, en todo caso, del grado de compactación propio del material.

4. Presión lineal estática

La acción de compactación de un rodillo vibratorio esta determinada en parte por su peso. El peso es transmitido al material suelo o a la mezcla a compactar por medio de los ejes y los tambores. El tambor se hunde profundamente en el material durante la primera pasada del proceso de compactación; un arco amplio (superficie de contacto) del cuerpo rodante se encuentra en contacto directo con el suelo. La superficie de contacto va disminuyendo y la presión superficial específica aumentando a medida que se eleva el grado de compactación del material. Entonces la presión específica ejercida por medio de las áreas de contacto varía con el aumento del grado de compactación del material.

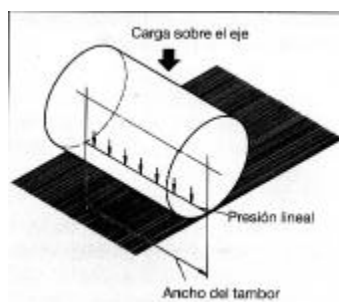


Fig 35. Presión lineal estática

Debido a la variación continua de la superficie de contacto se decidió hacer uso de la presión lineal estática para tener un standard de comparación. Para calcular este parámetro, especificado en kg/cm, se divide la carga sobre cada eje por el ancho del tambor correspondiente.

$$\text{presión lineal estática} = \frac{\text{Carga sobre el eje (kg)}}{\text{Ancho del tambor (cm)}}$$

Una presión lineal estática mayor del rodillo conduce a un aumento del efecto de profundidad. Con mayor presión lineal estática es posible compactar suelos con un bajo grado de capacidad de compactación y/o capas de relleno de mayor altura.

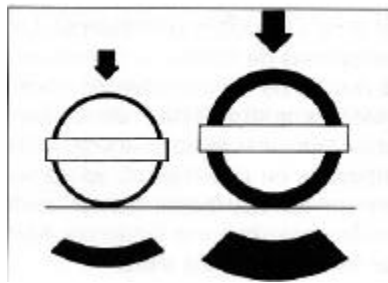


Fig 36. Influencia de la presión lineal estática

5. Presión lineal dinámica

La presión lineal dinámica es otro parámetro de importancia para los trabajos de compactación con rodillos vibratorios, ya que en este caso se toma en consideración la fuerza centrífuga generada en él o los excitadores de la maquina.

$$\text{presión lineal dinámica} = \frac{\text{Fuerza centrífuga (kn)}}{\text{Ancho del tambor (cm)}}$$

En general la presión lineal dinámica se especifica en kn/cm.

Al compararse dos o más rodillos dentro de una cierta clase de peso se deberá tener en mente que el rodillo con la mayor presión lineal dinámica lograra un mayor efecto de profundidad.

6. Velocidad de trabajo

La velocidad de trabajo del rodillo vibratorio es un factor de considerable importancia durante los trabajos de compactación. La distancia entre dos movimientos verticales de los tambores (la distancia de vibración o distancia entre

golpes) aumenta en forma directamente proporcional a la frecuencia de vibración de la máquina misma al aumentar la velocidad de marcha.

Velocidad de trabajo Km/hr	Frecuencia Hz			
	40	50	60	80
1	6.9	5.6	4.6	3.5
2	11.9	11.1	9.3	6.9
3	20.8	16.7	13.9	10.4
4	27.8	22.2	18.5	13.9
5	34.7	27.8	23.1	17.4
6	41.7	33.3	27.8	20.8

Tabla 5 Distancia de vibración en mm

Con un aumento de la velocidad de trabajo y asumiendo una frecuencia constante del excitador, el espacio entre vibraciones aumenta a la par con una disminución del rendimiento de compactación por unidad de superficie. durante la compactación de capas asfálticas y al trabajarse con equipos de baja frecuencia, esto puede conducir a ondulaciones (deformaciones) transversales en la superficie asfáltica.

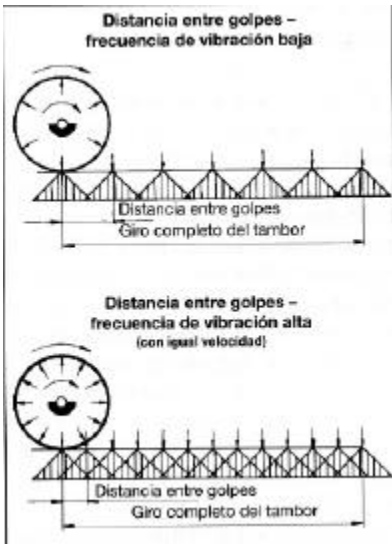


Fig 37. Frecuencia y distancia de vibración

En el caso de rellenos con material suelo y haciéndose uso de equipos de compactación con baja frecuencia se requerirá un mayor número de pasadas para poder alcanzar el grado requerido y correcto de la compactación.

En general se pueden recomendar las siguientes velocidades de trabajo:

- Velocidades entre 1 y 4 km/h para la compactación de suelos
- 2 a 6 km/h para la compactación de materiales bituminosos

al estudiar la tabla 5 se hace evidente que

- la intensidad de compactación está en relación directa con la velocidad de trabajo
- la intensidad de compactación esta directamente relacionada con la frecuencia del excitador
- a una cierta distancia de vibración dada, el rodillo con la frecuencia de vibración más alta es capaz de marchar a una velocidad de trabajo mayor.

Esto a su vez conduce a un definitivo incremento en la productividad.

RODILLOS CON CILINDROS PATA DE CABRA / PATA DE TACO

LA DIFERENCIA ENTRE PATA DE CABRA Y PATA DE TACO

Los rodillos pata de cabra / pata de taco tienen tres metas esenciales

- Deben incrementar la superficie del suelo
- Deben compactar en profundidades relativamente altas
- Deben lograr una densidad elevada del suelo

Se trata de lograr estas metas soldando al cuerpo del cilindro las llamadas patas (protuberancias que también se llaman pies, dientes o vástagos).

Dichas patas permiten diferenciar entre rodillos pata de cabra y pata de taco.

Originalmente no se conocía mas que un rodillo pata de cabra, denominado así porque la forma de las protuberancias se parecía mucho a la forma de las patas de ese animal.

Con el transcurso del tiempo esta forma varió tanto hasta el punto que se pareció mucho al taco de un zapato (por esto el nombre de pata de taco).

Pero no es la forma sino la aplicación típica del rodillo que determina si es pata de taco o pata de cabra como veremos a continuación.

Sin embargo se puede distinguir los dos tipos de equipo por sus pies pero no por su forma sino por su altura.

Así cuando las protuberancias de un cilindro miden

- 20 centímetros de altura es pata de cabra
y cuando dichas protuberancias miden
- entre 8 y 15 centímetros de altura es pata de taco

Cuando continuemos con las aplicaciones de los dos equipos se comprenderá fácilmente que es preciso hacer una diferencia.

EFFECTO DE APLICACIÓN DE LOS RODILLOS PATA DE CABRA / PATA DE TACO

EL RODILLO PATA DE CABRA

Muchas veces el contenido de agua en la fase intersticial de los suelos finos es demasiado elevado para una compactación efectiva.

Esta agua excesiva se deberá exprimir de los poros y subir a la superficie.

El agua en suelos finos tiende a formar una "película" alrededor de las partículas. Fuerzas electrostáticas causan un enlace extremadamente fuerte entre agua y partículas, lo cual se desenlaza solo bajo la aplicación de presiones enormes.

Aparte de la magnitud de las presiones es muy importante la forma de aplicarlas. No se debe aplicar rápida sino lentamente, se puede decir que debe ser exprimida el agua por un amasado.

Agua que no se enlaza con las partículas se llama agua libre. Esta agua libre debe ser subida por fuerzas capilares.

Una vez subida, el agua excesiva debe evaporar. La evaporación es causada por el sol y el viento. Pero no es el sol sino el viento que causa sobre todo la evaporación.

Por esto el agua que se sube a la superficie debe distribuirse para que el viento la pueda atacar mejor. En otras palabras cuanto más grande la superficie del suelo que encuentre el agua para distribuirse tanto mayor el área de ataque para el viento y como consecuencia tanto mas rápido el proceso de evaporación.

Tal aplicación , quiere decir la exprimación del agua en exceso por amasado y alta presión con un incremento simultáneo de la superficie del suelo, solo puede realizarse efectivamente con un rodillo pata de cabra.

Con las presiones adecuadas es relativamente fácil causar la subida del agua. Mas difícil es optimizar el efecto de amasado. Lo mas importante y también lo mas difícil es producir la mayor superficie posible. Para esta última tarea no solo se necesita patas de adecuada altura sino también de adecuada forma. La búsqueda a la forma ideal es la principal causa para la multitud de formas da patas de cabra que se encuentra en el mercado.

La siguiente se puede considerar como la forma de pata de cabra ideal. Con sus laterales de inclinación a la vez escarpa y debido a su redondez se logra el amasado deseado, ejerciendo al mismo tiempo altas presiones.

Además produce una artesa especialmente grande en el suelo. Esta forma ya patentada de pata de cabra tiene sobre todo la ventaja que no rompe la artesa producida al penetrar cuando la pata sale del hueco, lo que queda claro en el siguiente dibujo.

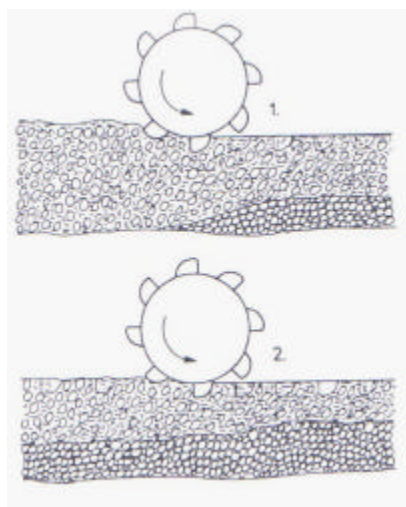


Fig 38. Rodillo pata de Cabra

Como podemos ver la pata produce una artesa que – cuando la pata penetra completamente – tiene contornos en forma de un semicírculo cuyo radio corresponde a la altura del pie.

La única desventaja de esta forma de pata es que su efecto completo solo se realiza en una dirección.

Referente a la altura de las patas de cabra suele añadir que cuanto mas alta la pata tanto mas profundo el hueco que produce y con esto tanto mayor la superficie para el proceso de la evaporación.

Dado que según definición las patas de taco tienen menos altura que las patas de cabra, son menos adecuadas las patas de taco para la aplicación que acabamos de explicar.

RODILLOS CON CILINDROS PATA DE TACO

Cuando se endurecen los suelos finos una vez realizado el proceso del secado, muchas veces la superficie queda casi tan sólida como una roca.

Además se encuentran a menudos materiales desmoronizados en los lugares de construcción. Estas condiciones exigen un poder rompedor que combine altas cargas aplicadas con gran velocidad.

Dicha velocidad de aplicar las cargas se logra sobre todo por medio de la vibración.

En los rodillos estáticos con cilindros pata de cabra / pata de taco se logra esa velocidad al aumentar la velocidad de rodamiento.

Pero esto estipula que

- las patas tengan menos altura y cantos agudos
- la colocación de las patas debe permitir un rodamiento rápido (ver colocación usuales de patas)

Dichas estipulaciones indujeron el desarrollo del cilindro pata de taco.

Mientras que la aplicación principal de los rodillos pata de cabra es el aumento de la superficie, la aplicación del rodillo pata de taco se concentra a trabajos de compactación que exijan altas presiones de contacto ejercidas con gran velocidad, sobre todo trabajos de demolición.

Dado que la pata de taco también logra aumentos en la superficie del suelo, se puede constatar que un rodillo pata de taco es un equipo mas versátil que un rodillo pata de cabra.

Generalmente tienen también mas área de contacto las patas de taco. Así su efecto areal será mayor que el del rodillo pata de cabra. Pero su efecto de amasado es inferior.

LA COMPACTACIÓN POR RODILLOS PATA DE CABRA / PATA DE TACO

La presión que ejerce el rodillo pata de cabra / pata de taco al suelo no es uniforme en el tiempo.

Los vástagos penetran ejerciendo presiones crecientes, las cuales llegan a un máximo en el instante en que el vástago esta vertical y en su máxima penetración.

A partir de ese momento la presión disminuye hasta que el vástago sale.

En las primeras pasadas las protuberancias y una parte del tambor mismo penetran en el suelo, lo que permite que la mayor presión se ejerza en el lecho inferior de la capa por compactar.

Para que esto ocurra el espesor de la capa no debe ser mucho mayor que la longitud del vástago.

Al aumentar el número de pasadas del equipo la parte inferior de la capa va adquiriendo mayor resistencia, lo que impide la penetración del rodillo y de sus vástagos, que así van compactando al suelo suprayacente.

El proceso puede llegar a un límite en el cual el rodillo “camina” sobre el suelo y transmite todo su peso a través de los vástagos, pero sin que haya contacto entre el tambor y el suelo propiamente dicho.

Así puede constatarse que los rodillos pata de cabra / pata de taco hacen progresar la compactación de la capa del suelo de abajo hacia arriba.

Esta manera de compactar produce dos efectos muy deseables:

- una distribución uniforme de la energía de compactación en cada capa.

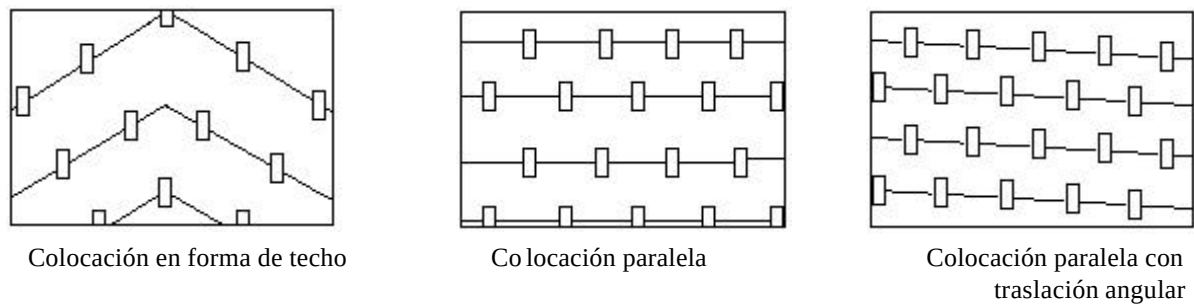
- Una buena liga entre capas sucesivas.

A esta peculiar manera de compactar se le denomina la compactación por amasado ya que se endenta una capa con su sucesiva como la masa de un pan o pastel.

COLOCACIONES USUALES DE PATAS

La manera en la cual se colocan las patas al tambor tiene influencia sobre el rodamiento (influyendo velocidades de trabajo y de aplicación de las cargas) y sobre el efecto areal.

Las colocaciones mas usuales son las siguientes :



Cada una de las distintas colocaciones tiene por objetivo de lograr con una pasada un conjunto de huellas igual o similar a esto:

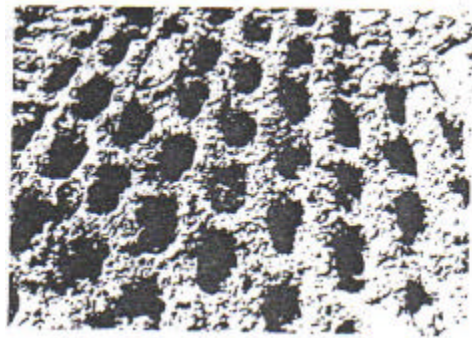


Fig 39. Colocación usual de patas

Y al mismo tiempo realizar movimientos de rodamiento. Un rodamiento regular se puede lograr cuando se trata de restringir el espacio entre patas a los menores ángulos posibles. Tal colocación se logra entre otras con la forma paralela con traslación angular.

RODILLO VIBRATORIO DOBLE DE CONDUCCION MANUAL

Los numerosos y diferentes tipos de rodillos ofrecidos en el mercado se subdividen en grupos de acuerdo al número, forma y disposición de los tambores, sistema de propulsión y tipo de compactación. Para mantenernos dentro del marco y rendimiento de los motores de los equipos vistos previamente, se discutirán solo rodillos de conducción manual, rodillos vibratorios doble livianos a semipesados y rodillos vibratorios dirigibles en el resto del presente capítulo.

En general, los rodillos de conducción manual están compuestos por dos tambores, ambos conectados por medio de un chasis rígido. La masa superior con el motor, tanques de agua - también tanque para líquido hidráulico en el caso de rodillos hidrostáticos - y la barra de mando ajustable en su altura se encuentra fijada elásticamente a la masa inferior - con sus tambores y chasis - por medio de elementos (topes) de caucho-metal. Para lograr una mejor maniobrabilidad y capacidad de ascenso en pendientes en todo tipo de terreno y bajo condiciones normales, ambos tambores son accionados en general por un sistema de engranajes.

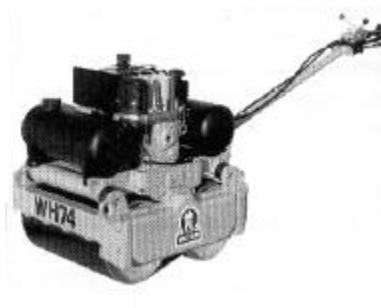


Fig 40. Rodillo vibratorio doble

Los tambores de los rodillos dobles de conducción manual generalmente están ubicados muy cerca uno del otro y han sido diseñados con el mismo diámetro. El diámetro de los tambores es relativamente pequeño (aprox. 400 a 550 mm) y por lo general cada tambor contiene en su interior un excitador. El accionamiento de marcha y vibración es inducido por lo general por medio de un sistema mecánico o

hidrostático. Gracias al bajo centro de gravedad se logra una buena maniobrabilidad y estabilidad en todo tipo de terreno.

Los fabricantes ofrecen rodillos con ancho de trabajo desde 40 cm para la compactación de zanjas hasta, por ejemplo, 100 cm de ancho, equipos estos que pesan entre 400 y 1500 kg y que generan fuerzas centrífugas entre aprox. 20 y 80 kn.

El peso de servicio (peso básico de la maquina inclusive equipo standard, tanques de combustible y tanques hidráulicos llenos inclusive tanques de agua a medio llenar para el sistema de riego) de los rodillos vibratorios dobles de conducción manual livianos se ubica por lo general debajo de los 500 kg. La presión lineal estática varía aprox. entre 5 y 7 kg/cm y la presión lineal dinámica (presión de vibración) por otro lado aprox. 0,20 a 0,30 kn/cm.

Los rodillos semipesados alcanzan pesos de servicio de entre 500 y 1000 kg, su presión lineal estática varía, según el ancho de trabajo de los tambores, entre 3.5 y 8.5 kg/cm. Los rodillos vibratorios dobles de conducción manual pesados alcanzan pesos de servicio hasta 1400 kgs y su presión lineal estática esta ubicada – debido a los tambores más anchos - dentro del rango de los 3.5 a 9 kg/cm.

En los rodillos vibratorios las fuerzas introducidas al material a compactar decrecen rápidamente al aumentar la profundidad, lo que a su vez significa una reducción del efecto de vibración. El efecto de impacto, de gran importancia para el efecto de compactación, es, sin embargo, relativamente bajo. Además, al contrario de la presión superficial generada por las planchas vibratoras y los vibroapisonadores, y debido principalmente a sus características constructivas, los rodillos sólo transmiten su fuerza centrífuga en forma lineal y formando un cono de presión al material a ser compactado. Es por esta razón que los rodillos vibratorios simplemente no son capaces de alcanzar el mismo efecto de profundidad tal como lo

logran en comparación las planchas o los apisonadores. Las capas del material de relleno deberán ser, inevitablemente, de espesores menores.

Los principales campos de aplicación de este tipo de rodillos vibratorios podrán ser encontrados en la compactación de grandes superficies de arenas, gravillas, gravas y piedras partidas, compactación de sub-bases y materiales bituminosos y, por último, trabajos de acabado. Gracias a la altura lateral libre (en general de un solo lado) es posible trabajar bien cerca de muros bajos, aceras y cordones. Preferentemente se elige este tipo de equipo para la compactación de superficies con áreas pequeñas, trabajos de bacheo y también para la compactación de áreas con reforzamientos de baja altura.

Rodillos especiales, tales como por ejemplo los llamados rodillos para zanjas, ofrecen grandes ventajas para cierto tipo de aplicaciones. Este tipo de máquina se destaca por lo general por su escaso ancho. Sin embargo, cuando se requiera efectuar trabajos de compactación en espacios confinados o cerca de ángulos o esquinas se deberá considerar la conveniencia de utilizar vibroapisonadores (equipos mucho más livianos y maniobrables) o también posiblemente planchas vibradoras.

Los rodillos vibratorios se prestan perfectamente para la compactación de materiales de relleno granulares. Una vez determinado el óptimo espesor de la capa y el número correspondiente de pasadas (en concordancia con las especificaciones técnicas del rodillo) se logran excelentes resultados en la compactación, los cuales están en completo acuerdo con los requerimientos de recomendaciones, normas, standards y especificaciones fijadas por las autoridades competentes.

Los rodillos vibratorios dobles realizan en forma excelente trabajos de compactación de materiales bituminosos fríos o calientes, siempre y cuando hayan sido provistos de un sistema especial de riego; tal sería el caso en por ejemplo trabajos de bacheo, en la repavimentación de senderos para bicicletas o peatones.

Algunos rodillos vibratorios de conducción manual son capaces con los tambores desplazados (paso de perro) (ver fig 41). El desplazamiento de los tambores permite compactar superficies más anchas en una sola pasada, no debiéndose olvidar sin embargo que en este caso se deberá esperar un rendimiento de compactación levemente reducido.

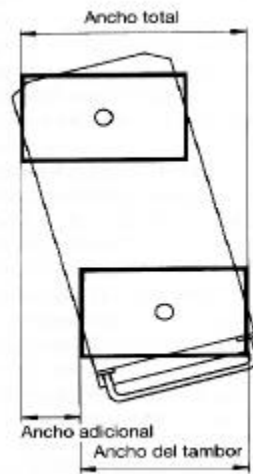


Fig 41. Rodillo para zanjas durante una aplicación con los tambores desplazados

Rodillos articulados cuyos tambores pueden ser conducidos de modo independiente ofrecen una ventaja en áreas confinadas tales como curvas angostas y compactación alrededor de zanjas con obstáculos.

Es especialmente importante que el material no sea desplazado lateralmente o arrancado durante la compactación en curvas. Es por esta razón, y principalmente en áreas confinadas, que la compactación con rodillos con conducción del tipo oruga solo pueda ser recomendado con cierta reserva. Esta afirmación es simple de explicar: debido a la técnica de conducción utilizada, en la cual tanto las mitades de los tambores delanteros como también de los traseros giran en direcciones opuestas para lograr hacer girar la maquina, el material de relleno que acaba de ser compactado es vuelto a ser parcialmente removido y perturbado.

Justamente para el caso de la compactación de suelos extremadamente cohesivos y para aplicaciones en zanjas es altamente recomendable la tracción en ambos tambores. Los obstáculos pueden ser sobrepasados de mejor manera y en

suelos con un alto contenido de agua el rodillo no se empantana con tanta facilidad. Adicionalmente la tracción en ambos pares de tambores mejora el apoyo, especialmente al entrar o salir el rodillo de una zanja.

Dispositivos de seguridad, tales como el sistema de hombre muerto y la protección contra aplastamientos están hoy día reglamentados por normas de seguridad y no deberán bajo concepto alguno ser manipulados o desconectados por el operador o persona alguna.

RODILLOS PARA ZANJAS

Para trabajos normales de compactación en zanjas se utilizan en general vibroapisonadores o, alternativamente, planchas vibradoras.

Al estar en presencia de suelos cohesivos las planchas vibradoras muchas veces tienden a atascarse mientras que, por otro lado, los vibroapisonadores ya no producen resultados satisfactorios. En tales casos resultara necesario proceder a una sustitución del material suelo o, alternativamente, se deberá proceder a agregar materiales granulares, tales como gravas o arenas.



Fig 42. Compactación con un rodillo para zanjas

El alto costo asociado con una sustitución del suelo o, alternativamente, el agregado de materiales granulares en muchos casos podrá ser evitado empleando un eficiente y maniobrable rodillo para zanjas. Este tipo de rodillo encuentra su aplicación preferentemente con suelos muy cohesivos y otros suelos de granos muy

finos con un alto contenido de agua, sin olvidar su excelente rendimiento de compactación en suelos cohesivos mixtos, suelos granulares y rellenos compuestos de pedrería blanda. Adicionalmente a la vibración del material por medio de los tambores mismos, los tambores pata de cabra amasan y batean el material a ser compactado en dirección horizontal.

El rodillo vibratorio para zanjas alcanza a compactar capas de hasta aprox. 60 cm de profundidad si la composición granulométrica del material cohesivo es favorable. El efecto de profundidad durante la compactación disminuye rápidamente en materiales muy blandos, contribuyendo así a una falta de compactación en los estratos más profundos de la capa.

De esta forma el rodillo para zanjas contribuye al drenaje del suelo, a una reducción de los espacios vacíos (volumen de poros) y a una reestructuración de las partículas. Terrones de material suelo y piedras blandas son reducidas en tamaño o trituradas con lo cual disminuyen a consecuencia los asentamientos naturales no deseados.

Un rodillo vibratorio para zanjas siempre deberá estar provisto (de fábrica) con un punto de suspensión central; la máquina podrá ser fácilmente colocada o, por el contrario, retirada de la zanja con, por ejemplo, una maquina excavadora, una grúa o aun un sistema de carga de un camión de obra.

Algunos fabricantes ofrecen rodillos vibratorios para zanjas con control remoto a rayos infrarrojos de fácil manejo, contribuyendo así en forma significativa hacia la seguridad del operario de la máquina.

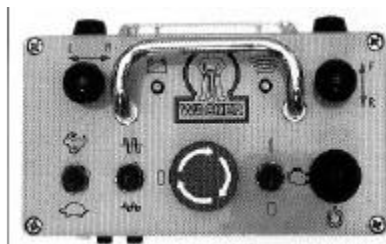


Fig 43. Control remoto infrarrojo

Un fabricante en especial ofrece una solución simple claramente dispuesta y de fácil manejo con respecto al control remoto infrarrojo. Solo son necesario cuatro controles de mando para poner en funcionamiento o activar las diferentes funciones del rodillo vibratorio.

La unidad transmisora infrarroja ha sido equipada adicionalmente con un ancho cinto ajustable, para poder así llevar la unidad colgada del cuello, permitiendo así que el operario trabaje sin fatigarse innecesariamente.

En el caso de un rodillo vibratorio a control remoto el operario puede controlar el rodillo para zanjas desde una distancia segura. De esta manera es posible:

- arrancar y parar el motor con una llave de arranque removible
- hacer marchar el rodillo en dirección de avance o retroceso por medio de una palanca de mando con función de hombre muerto integrada. La palanca de mando permite simultáneamente girar el tambor delantero hacia la izquierda o la derecha para poder así variar la dirección de marcha según sea necesario
- gobernar también el tambor trasero mediante la utilización de otro control
- además lograr, mediante el simple giro de un interruptor giratorio,
 - la compactación sin vibración (o sea, compactación estática)
 - conectar la vibración en uno o, alternativamente, en ambos tambores.
 - Pasar a la velocidad de marcha alta del rodillo.

La distancia de trabajo del operario al rodillo podrá ser máximo 25 m en una dirección, de acuerdo a las normativas de seguridad. Diversos canales de transmisión aseguran una gran flexibilidad. Un fácil cambio de los mismos permite la operación simultánea de dos o más rodillos en la misma obra. Por razones de seguridad se ha diseñado y construido la electrónica de tal forma que la máquina se detiene inmediatamente al haber un obstáculo entre ella y el operador. Lo mismo ocurre al desviar el operador su atención y la unidad transmisora de la maquina y se pierde el contacto directo (por Ej. en la conversación con otra persona).

Como medida de seguridad se ha fijado en 25 m el radio de trabajo máximo del rodillo vibratorio de control remoto a rayos infrarrojos. Una medida de seguridad adicional evita que la maquina avance en dirección alguna si el operario se encuentra dentro de una zona circular de seguridad, con radio de 3 m a partir del rodillo.

Al efectuarse trabajos con un rodillo vibratorio dentro de zanjas las ventajas del control remoto a rayos infrarrojos son múltiples:

- El operario puede guiar su maquina desde arriba de los costados superiores de la zanja sin estar sujeto a los peligros de un derrumbe de las paredes de la zanja
- El operario no esta expuesto a los gases de escape del motor remanentes en el fondo de la zanja
- El operario no esta expuesto a las emisiones de ruido del equipo vibratorio y del motor
- El operario no esta expuesto a las vibraciones originadas por la maquina ni al polvo generalmente presente durante trabajos de compactación.

RODILLOS VIBRATORIOS PARA TRABAJOS EN CAPAS ASFALTICAS

Este tipo de rodillo es, por lo general, relativamente liviano, con pesos de servicio llegando, por el lado bajo, a aprox. 1.2 toneladas. La falta de peso es compensada por la vibración adicional, estos rodillos son fáciles de transportar y maniobrar. Para la pre-compactacion de los materiales bituminosos se los utiliza sin vibración, para luego trabajar con vibración durante el proceso principal de compactación.

En general se pueden esperar las siguientes propiedades y ventajas en rodillos vibratorios para aplicaciones sobre materiales bituminosos:

- Equipamiento con asiento de conductor

- Conducción por medio de una unión central articulada con servo-mando para aplicaciones en zonas confinadas
- Velocidad de marcha en ambas direcciones infinitamente variable de aprox. 0 – 6 km/h
- Arranque suave, aún en pendientes
- Tracción en todos los tambores para lograr, entre otros, una buena capacidad de ascenso
- De gran altura a los costados y sin protuberancias
- Sistema de riego por agua regulable y variable
- Fuerza centrífuga mínima de 10 kn con vibración automática.

El rodillo vibratorio expuesto en la Fig 44 ha sido diseñado en conformidad con todos los requerimientos recién mencionados. Sus campos de aplicaciones principales se ubican en la compactación de materiales bituminosos en senderos peatonales para bicicletas, calles de servicio en bosques, parques y jardines como también para el uso en playas de estacionamiento.



Fig 44. Rodillo vibratorio con asiento de conductor

Una ventaja importante adicional es su gran altura lateral libre, altura esta que permite efectuar trabajos junto a, por ejemplo, cordones evitando así trabajos de acabado adicionales.

LA SELECCIÓN CORRECTA DE EQUIPOS PARA LA COMPACTACIÓN DE SUELOS

¿Cuales son los factores que influyen sobre la compra y las aplicaciones de equipos de compactación?

Estas preguntas no siempre pueden ser contestadas con facilidad. Tal como ya fuera visto en los capítulos anteriores se deben considerar toda una serie de factores, factores estos que forman parte del “acta personal” del material a compactar, tales como por ejemplo tipo de suelo, forma y rugosidad de la partícula individual como también a la distribución granulométrica.

Adicionalmente se deben considerar las condiciones específicas de la obra, el porcentaje de compactación prescrito del material a ser compactado (densidad Proctor), además de las condiciones especiales del contrato.

Los factores recién mencionados deberán ser analizados para poder determinar:

1. Que tipo de máquina es la mas adecuada según el trabajo a efectuar y
2. Con que equipo se logra alcanzar, en la forma más económica, los resultados requeridos.

Al decidir sobre un equipo de compactación, se deberá definir, ante todo, desde el inicio, si el equipo va a ser utilizado predominantemente para suelos granulares (no cohesivos) o suelos cohesivos.

SUELOS NO COHESIVOS

Los suelos granulares se dejan compactar de mejor forma y lo mas económicamente posible por medio de la vibración(compactación dinámica).

La vibración reduce la fricción entre las partículas individuales del suelo, permitiendo simultáneamente una redistribución de estas mismas partículas. Gracias a la vibración se logran reducir los volúmenes de poros y las inclusiones de agua y aire son desplazadas hacia la superficie, obteniéndose paralelamente una mayor

compacidad (densidad seca) del material suelo. Dado que la vibración aumenta el efecto de la compactación en la profundidad es posible especificar capas de mayor profundidad, contribuyéndose con ello a una compactación más efectiva y económica.

En general, y gracias a su intensivo efecto de compactación, planchas vibradoras se utilizan para lograr óptimos resultados en la compactación de suelos no cohesivos.

Adicionalmente se deberán considerar los excelentes resultados en la compactación, la alta performance (producción), el alto grado de confiabilidad y los costos resultantes relativamente bajos, de esta clase de equipos.

Para la compactación de grandes superficies con suelos granulares se utilizan en general rodillos vibratorios.

SUELOS COHESIVOS

Para llevar a cabo en forma correcta y efectiva la compactación de un suelo cohesivo es necesario que el material sea amasado y, a la par, presionado o golpeado en forma vigorosa.

En suelos cohesivos la acción de la fuerza de impacto de un vibroapisonador reduce a un mínimo la adhesión (cementación) entre las partículas individuales (cohesión real). Adicionalmente es reducida la fricción entre partículas. Las inclusiones de aire y/o agua son desplazadas en dirección a la superficie. De esta manera se obtiene una compacidad mayor.

Una elevada altura de salto del pisón de un vibroapisonador es deseable, ya que de esta forma es posible obtener un alto trabajo de impacto por golpe como también para garantizar un mejor avance del equipo. La alta secuencia de golpes dentro del orden de 500 a 800 golpes por minuto hace que las partículas giren, oscilen y vibren y se mantengan en constante movimiento, lo que es una gran

ventaja durante la compactación de suelos tanto cohesivos como también no cohesivos.

A menudo dentro de zanjas se utilizan rodillos vibratorios con tambores pata de cabra, un tipo de máquina de uso universal o sea para todo tipo de suelos. El tambor pata de cabra es especialmente apto para la compactación de suelos cohesivos, ya que no solo vibra con alta frecuencia sino que además bate y amasa simultáneamente al material, acciones estas que ayudan a la eliminación de las inclusiones de agua y aire. Al mismo tiempo se reducen a un mínimo los terrones grandes incluidos en el material suelo, obteniéndose así capas homogéneas y densas.

Finalmente, al seleccionar un equipo de compactación para ser utilizado sobre suelos semicohesivos a granulares considere siempre en primer lugar una plancha vibradora o un rodillo vibrante.

Al seleccionar un equipo de compactación para ser utilizado sobre suelos semicohesivos a cohesivos considere siempre en primer lugar un vibroapisonador o u rodillo vibratorio con tambores pata de cabra.

A continuación se presenta una tabla en la cual se enumeran diferentes tipos de equipos de compactación, divididos en distintas categorías de peso, correlacionados con diferentes grupos de suelos y profundidades de compactación. Aun cuando esta tabla ha sido destinada en primer lugar a la compactación de materiales en zanjas, la relación entre el tipo de equipo y el tipo de suelo a compactar puede ser claramente reconocida.

Zona y tipos de equipos para la compactación		Peso de servicio (Kg)	Tipos de suelos								
			I			II			III		
			Suelos granulares (no cohesivos)			Suelos mixtos			Suelos arcillosos (cohesivos)		
			Apti- tud	Capa (cm)	n° de pasadas	Apti- tud	Capa (cm)	n° de pasadas	Apti- tud	Capa (cm)	n° de pasadas
1. Equipos livianos de compactación											
Vibroapiso- nadores	Liviano	Hasta 25	+	Hasta 15	2 – 4	+	Hasta 15	2 – 4	+	Hasta 10	2 – 4
	Mediano	25 – 60	+	20 – 40	2 – 4	+	15 – 30	3 – 4	+	10 – 30	2 – 4
Planchas vibradoras	Liviano	Hasta 100	+	Hasta 20	3 – 5	●	Hasta 15	4 – 6	-	-	-
	Mediano	100 – 300	+	20 - 30	3 – 5	●	15 - 25	4 – 6	-	-	-
Rodillos vibrantes	Liviano	Hasta 600	+	20 – 30	4 – 6	●	15 - 25	5 – 6	-	-	-
2. Equipos semipesados y pesados de compactación											
Vibroapiso- nadores	Mediano	25 – 60	+	20 – 40	2 – 4	+	15 – 30	2 – 4	+	10 – 30	2 – 4
	pesado	60 – 200	+	40 – 50	2 – 4	+	20 – 40	2 – 4	+	20 – 30	2 – 4
Planchas vibradoras	Mediano	300 – 750	+	30 – 50	3 – 5	●	20 - 40	3 – 5	-	-	-
	pesado	Mas de 750	+	40 – 70	3 - 5	●	30 - 50	3 - 5	-	-	-
Rodillos vibratorios		600 - 8000	+	20 – 50	4 - 6	+	20 - 40	5 - 6	-	-	-
· satisfactorio + apropiado - no apto											
* Las alturas de las capas incluidas en esta tabla son empíricas y además variables según la distribución granulométrica y el grado de humedad del suelo a compactar.											

Tabla 6 Campos de aplicaciones para equipos mecánicos de compactación.

APLICACIONES TIPICAS PARA EQUIPOS DE COMPACTACIÓN DINAMICA

En general los equipos de compactación vibratoria (compactación dinámica) son utilizados principalmente en la compactación de suelos y capas asfálticas, pero adicionalmente se los utiliza también para otros tipos de aplicaciones tales como la vibración de pavimentos adoquinados, también llamados autoblocantes o adocretos, o para la compactación de capas poco espesas de hormigón pesado. La tabla 7 muestra algunas de los muchos campos de aplicaciones posibles para equipos vibratorios.

Campos de aplicaciones principales	Tipo de maquina					
	Vibroapis onadores	Plancha vibradora	Rodillos mono-cilíndricos	Rodillos de doble vibración	Rodillos pata de cabra	Rodillos vibrantes articulado
Compactación de suelos						
Zanjas estrechas para cables y tuberías	+	●	-	-	-	-
Zanjas	+	+	●	-	+	-
Trabajos de cimientos	+	+	●	+	+	-
Rellenos alrededor de estructuras	+	+	●	+	+	-
Parques y jardines	+	+	+	+	●	+
Caminos para peatones y ciclistas	●	+	+	+	-	+
Accesos a parques y jardines	●	+	+	+	-	+
Instalaciones deportivas	-	+	●	+	-	+
Estacionamientos y zonas industriales	-	●	-	+	-	+
Construcciones viales	●	●	-	+	●	+
Construcciones ferroviarias	●	+	-	+	●	-
Ingeniería hidráulica y basurales	●	●	-	●	+	-
Compactación de asfaltos						
Trabajos de bacheo	+	+	+	+	-	+
Caminos para peatones y ciclistas	●	+	+	+	-	+
Accesos a parques y jardines	●	+	+	+	-	+
Estacionamientos y zonas industriales	-	●	●	+	-	+
Construcciones viales	●	●	●		-	+
Otros trabajos de compactación						
Adoquines naturales o de hormigón	●	+	-	-	-	-
Hormigón rodillado (roll-crete)	●	+	●	+	●	+
Hormigón seco apisonado	+	●	●	-	-	-
· satisfactorio - no apto + apropiado						

Tabla 7 Aplicaciones típicas para equipos de compactación dinámica.

LA ECONOMIA Y EL RENDIMIENTO EN LA MAQUINARIA DE COMPACTACION

Hasta aquí se han discutido en detalle los diferentes tipos de suelos, sus densidades y los métodos de control como así también las ventajas de una buena compactación del material de relleno.

Adicionalmente se han estudiado los principios de funcionamiento y aplicaciones de vibroapisonadores, planchas vibradoras y rodillos vibratorios. Se han discutido además los criterios para la correcta selección de la máquina de compactación. Considero que en el futuro la correcta selección de un equipo para la compactación de suelos o también asfaltos no debería presentar ningún tipo de dificultades.

La meta de esta tesis es ofrecer un mejor entendimiento respecto al tema de compactación en general y especialmente la relación entre costos y rendimiento de la maquinaria de compactación, tema que abordaremos en el presente capítulo.

RENDIMIENTO DE UNA PLANCHA VIBRADORA

¿Cómo se procede para el cálculo del rendimiento de compactación de una plancha vibradora?

Desgraciadamente el rendimiento de una plancha es juzgado en muchos casos en base a la velocidad de avance de la misma. Sin embargo solo es posible alcanzar una alta velocidad de marcha a cambio de una compactación insuficiente y un efecto de profundidad reducido, tal como ya hemos visto anteriormente.

Para calcular correctamente el rendimiento de compactación de una plancha vibradora se deberán tomar en consideración los siguientes parámetros: ancho de la placa base, velocidad real de avance sobre el material a compactar y profundidad de compactación verificada, más el número de pasadas requerido para llegar a una compactación homogénea y uniforme del material.

Una vez determinados estos parámetros se podrá pasar a calcular el rendimiento de compactación en m³/hr mediante la utilización de la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{V \times B \times H \times 60}{Z} = \text{m}^3/\text{hora}$$

Donde

Q = rendimiento de compactación (en m³/hora).

V = velocidad de trabajo (m/min)

B = ancho de la placa base, inclusive las placas adicionales (en mt)

H = profundidad de la capa compactada(mt).

Z = numero de pasadas necesarias para alcanzar la compactación requerida.

Las empresas distribuidoras de maquinarias en sus folletos ó manuales recomiendan optar por la plancha vibradora con el rendimiento de compactación mas alto, tal como el calculado por medio de la fórmula recién indicada, ya que la misma resulta la más económica en su utilización. Sin embargo, estas empresas por lo general extranjeras realizan sus estudios en sus países de origen (países desarrollados) donde las condiciones económicas son otras, es por esta razón que se debe asentar estos estudios a la realidad del país. Veremos todo esto explicado mas adelante en un ejemplo donde se podrá apreciar la forma en que afecta el rendimiento de la máquina en los costos de ésta aquí en Chile y en el extranjero (Alemania).

RENDIMIENTO DE LOS RODILLOS DE COMPACTACIÓN Y VIBROAPISONADORES

También con rodillos y vibroapisonadores la base para juzgar el rendimiento de compactación no deberán ser criterios aparentes cualesquiera, tal como en el caso de las planchas vibradoras. Las verdaderas variables o parámetros que ejercen una influencia sobre el rendimiento de compactación son el numero de pasadas, el

ancho de trabajo o compactación, la velocidad de marcha y el espesor de la capa del material de relleno. El ancho de trabajo es un valor conocido desde el inicio mientras que la velocidad de marcha, número de pasadas y espesor de la capa depende en alto grado de la acción de compactación del equipo y de la capacidad del material a ser compactado. Todos estos parámetros deberán ser estimados previamente para realizar los estudios correspondientes (la tabla 6 presta una gran ayuda en este tema).

La fórmula a utilizar para el cálculo del rendimiento de compactación de un rodillo y un vibroapisonador es igual a la que fuera utilizada para las planchas vibradoras. También en este caso las empresas afirman que el equipo con mayor rendimiento de compactación será, a la par, el equipo más eficiente y económico y por lo tanto deberá ser favorecido correspondientemente.

ECONOMIA POR RENDIMIENTO

Al calcular los costos de la compactación se deberá tomar en consideración, los costos de adquisición de la máquina misma, los costos de la mano de obra, los costos de funcionamiento como así también los costos de depreciación y mantenimiento.

El siguiente ejemplo enseñará como calcular los costos de la compactación y, a la par, como el rendimiento del mismo equipo de compactación influye sobre estos costos. Primero realizaremos el ejemplo tal como lo realizan las empresas distribuidoras de maquinaria, con la salvedad que trabajaremos en pesos chilenos no en dólares como en sus manuales (países desarrollados), y luego el mismo ejemplo lo asentaremos a la realidad del país.

El ejemplo se basa en la comparación de dos planchas vibradoras, eficientes en el rendimiento y de alta calidad, en diferentes categorías de peso y con fuerzas centrífugas generadas diferentes, ambas provenientes del mismo fabricante. Tanto el

precio de la máquina, los costos laborales, los valores de los rendimientos y las fórmulas utilizadas son reales y corresponden a máquinas bien conocidas en el mundo de la construcción (máquinas de la Empresa Wacker).

Descripción		DPU 2950H	DPU 6055
Peso de servicio	kg	192	478
Ancho de trabajo	cm	50	71
Fuerza centrífuga	kn	29	60
Espesor de capa(de acuerdo al suelo)cm		30	50
Velocidad de avance	m/min	22	28
Rendimiento superficial	m ² /h	660*	1193*
Rendimiento de compactación	m ³ /h	198	596
Consumo de combustible	l/h	1.2	2.2
Precio de la máquina	\$	4.354.420	8.167.123

*sin traslapado

Tabla 8 Especificaciones técnicas y valores de rendimiento de las planchas vibradoras a ser comparadas(en Alemania)

Alrededor de la fundación de un edificio un material de relleno granular mixto (bien graduado) deberá ser compactado con una densidad Proctor de 95 – 100 % (ver Fig 45).

Se estima alcanzar la densidad Proctor (densidad seca) requerida en 3 pasadas, debiéndose para ello prestar atención a la altura máxima efectiva de la capa para cada una de las máquinas y también si el porcentaje de humedad del material de relleno se ubica cerca del valor óptimo. La fundación es rectangular, midiendo 100 x 80 m y la excavación tiene un ancho medio de 3 m como también una profundidad media de 3m.

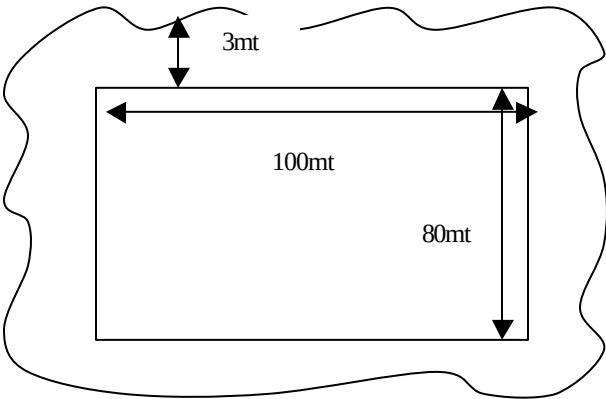


Fig 45. Sección de la obra para el cálculo del material de relleno

Para determinar los costos operativos y el costo total se asumirá que:

- 1) La expectativa de vida de las planchas vibradoras (en Alemania) es establecida en 3000 horas cada una.
- 2) Los costos de depreciación por hora de trabajo se determinarán al amortizar el precio de la máquina por las 3000 hrs de expectativa de vida.
- 3) Los costos de mantenimiento y reparaciones se fijarán con un valor del 80 % de los costos de depreciación.
- 4) El precio del combustible diesel se ha estimado en \$ 250 por litro.
- 5) El costo de mano de obra por hora es de \$27.000, en Alemania.

Con los valores recién mencionados se podrá proceder a calcular los costos de depreciación, mantenimiento y reparaciones, los costos del combustible y la mano de obra(ver tabla 9).

DPU 2950H	DPU 6055
Costos de depreciación	
Precio de lista/ expectativa de vida	
4.354.420/3.000= 1.451,47	8.167.123/3.000= 2.722,37
\$/h	\$/h
Costos de mantenimiento y reparaciones	
Depreciación x 80 %	
1.451,47 x 80/100= 1.161,18	2.722,37 x 80/100= 2.177,90
\$/h	\$/h
Costo del combustible	
Litros/h x \$/litro	
1.2 x 250= 300 \$/h	2.2 x 250= 550 \$/h
Costo de la mano de obra por hora	
27.000 \$/h	27.000 \$/h
Costo de la máquina por hora de trabajo	
TOTAL =29.912,65 \$/h	TOTAL =32.450,27 \$/h

Tabla 9. Costos de la máquina por hora de trabajo

El volumen total en m³ del material de relleno a ser compactado podrá ser calculado en base a las medidas dadas en la Fig. 45:

$$2 \times [(80 \times 3 \times 3) + (106 \times 3 \times 3)] = \mathbf{3.348\ m^3}$$

Comparación: Para rellenar una zanja de 372 m de largo con 3 m de ancho y 3 m de profundidad se requiere la misma cantidad de material de relleno (3.348 m³).

Ahora se podrá calcular el costo total resultante para la compactación completa del material de relleno con la máquinas mencionadas anteriormente, tal como indicado en la tabla 10:

DPU 2950H	DPU 6055
<u>Rendimiento con 3 pasadas</u>	
Rendimiento de compactación/ n° de pasadas	
198/3= 66 m³/h	596/3= 198,66 m³/h
<u>Tiempo requerido para la compactación</u>	
Metros cúbicos totales/ metros cúbicos por hora	
3.348/66≈ 51 hr	3.348/198,66≈ 17 hr
<u>Costo total para el trabajo de compactación</u>	
Costo de la maquina por hora de trabajo x tiempo	
29.912,65 x51= \$1.517.387	32.450,27 x 17= \$546.497

Tabla 10. Costo total par el trabajo de compactación(en Alemania).

La tabla 10 es muy importante, dado que se podrán sacar los siguientes datos y conclusiones para efectuar comparaciones:

- El rendimiento real de cada una de las máquinas individuales
- La cantidad total de material de relleno a ser compactado
- Los costos determinados en la tabla 9
- Los costos del operario.

Al observar la tabla 9 es fácil notar que los costos reales por hora de trabajo de la máquina DPU 6055 son 27 % más bajos que los de la máquina DPU 2950H. Por otro lado, y al estudiar la tabla 10, se hace evidente que la máquina de menor costo y rendimiento DPU 2950H requiere un gasto adicional de \$ 970.890 (180 %) para compactar la misma cantidad de material de relleno en m³. Por otro lado, la máquina más costosa (+ \$ 3.812.703) pero más eficiente DPU 6055 con su alto rendimiento de compactación terminará el mismo trabajo en un tercio del tiempo de la otra máquina(33 %).

Proyectando más allá la eficiencia de la máquina con el mayor rendimiento de compactación – palabra clave “economía por rendimiento” – se hace evidente que la

máquina originalmente más cara (precio de compra) neutraliza o compensa la diferencia de precio con la máquina menos costosa en un período muy corto de tiempo. Se podrá percibir en la tabla 10 que el ahorro de \$ 970.890, será alcanzado en solo 17 horas de trabajo. La diferencia de precio inicial de \$ 3.812.703, entre las dos máquinas desaparecerá después de solo $3.812.703 \times 17 / 970.890 = 66$ horas de trabajo.

En conclusión, se podrá aseverar definitivamente que el contratista que siempre vuelve a tener trabajos de compactación ahorrará dinero con la máquina más eficiente en el rendimiento, aún cuando esta tenga un costo más elevado en el momento de la compra, ya que el alto rendimiento de compactación (rendimiento volumétrico) rápidamente compensará los costos más altos de la inversión original.

Es necesario recordar que esta realidad es ajena a nuestro país y, para corroborar lo anterior realizaremos el mismo ejercicio esta vez con los precios y estándares de Chile. Para ello utilizaremos la tabla 8, ya que no varía en nada y para determinar los costos operativos y el costo total se asumirá que:

- 1) La expectativa de vida de las planchas vibradoras (en Chile) es establecida en 6000 horas cada una.
- 2) Los costos de depreciación por hora de trabajo se determinarán al amortizar el precio de la máquina por las 6000 hrs de expectativa de vida.
- 3) Los costos de mantenimiento y reparaciones se fijarán con un valor del 80 % de los costos de depreciación.
- 4) El precio del combustible diesel se ha estimado en \$ 250 por litro.
- 5) Los costos por mano de obra se han establecido en \$ 800 por hora.

Con los valores recién mencionados procederemos a calcular los costos de depreciación, mantenimiento y reparaciones, los costos del combustible y la mano de obra (ver tabla 11).

DPU 2950H	DPU 6055
Costos de depreciación	
Precio de lista/ expectativa de vida	
4.354.420/6.000= 725,73 \$/h	8.167.123/6.000= 1.361,18 \$/h
Costos de mantenimiento y reparaciones	
Depreciación x 80 %	
725,73 x 80/100= 580,58 \$/h	1.361,18 x 80/100= 1.088,94 \$/h
Costo del combustible	
Litros/h x \$/litro	
1,2 x 250= 300 \$/h	2,2 x 250= 550 \$/h
Costo de la mano de obra por hora	
800 \$/h	800 \$/h
Costo de la máquina por hora de trabajo	
TOTAL =2.406,33 \$/h	TOTAL =3.800,14 \$/h

Tabla 11. Costos de la máquina por hora de trabajo(en Chile)

Ahora se podrá calcular el costo total resultante para la compactación completa del material de relleno con la máquinas mencionadas anteriormente, tal como indicado en la tabla 12:

DPU 2950H	DPU 6055
Rendimiento con 3 pasadas	
Rendimiento de compactación/ n° de pasadas	
198/3= 66 m³/h	596/3= 198,66 m³/h
Tiempo requerido para la compactación	
Metros cúbicos totales/ metros cúbicos por hora	
3.348/66= 51 hr	3348/198,66= 17 hr
Costo total para el trabajo de compactación	
Costo de la maquina por hora de trabajo x tiempo	
2.406,33 x 51= \$122.723	3.800,14 x 17= \$64.602

Tabla 12. Costo total par el trabajo de compactación(en Chile).

Si observamos la tabla 11 podemos apreciar que los costos reales por hora de trabajo de la máquina DPU 6055 son 60 % más altos que los de la máquina DPU 2950H. Por otro lado, y al estudiar la tabla 12, se hace evidente que la máquina de menor costo y rendimiento DPU 2950H requiere un gasto adicional de \$ 58.121 (90 %) para compactar la misma cantidad de material de relleno en m³. Por otro lado, la máquina más costosa (+ \$ 3.812.703) pero más eficiente DPU 6055 con su alto

rendimiento de compactación terminará el mismo trabajo en un tercio del tiempo de la otra máquina(33 %).

Se podrá percibir en la tabla 12 que el ahorro de \$ 58.121, será alcanzado en 17 horas de trabajo. La diferencia de precio inicial de \$ 3.812.703, entre las dos máquinas desaparecerá después de $3.812.703 \times 17 / 58.121 = 1115$ horas de trabajo.

En conclusión, ya no es factible como en el caso anterior (Alemania) aseverar que se ahorrará dinero con la máquina más eficiente en el rendimiento, ya que el alto rendimiento de compactación no compensará tan rápidamente los costos más altos de la inversión original (en el caso de Chile).

¿ECONOMICO O JUSTIPRECIO?

El juego de palabras en el encabezamiento de esta parte del capítulo es un tema a ser ponderado sin reservas en el momento de la compra de un equipo de construcción de conducción manual. Una persona justificadamente podrá preguntarse ¿por qué justamente aquí?.

La razón es muy simple: Como ya hemos visto, la economía no depende solo del rendimiento de la máquina sino también del precio de compra, por lo tanto no es del todo cierto que se debe optar por la máquina con el rendimiento más alto, ya que la misma resulta mas económica en su utilización. Como se pudo apreciar en el ejemplo anterior el período de retorno de la inversión inicial es muy diferente en Chile en relación al de un país desarrollado (66 contra 1.115 horas).

La explicación de lo anterior radica en los costos laborales, en países desarrollados son muy altos (o muy bajos en los países sub-desarrollados), por lo tanto, es decisivo para el contratista o para los empleados responsables de los cálculos de costos, poder determinar si el operario es capaz de compactar una mayor cantidad de metros cúbicos en la menor cantidad de tiempo posible, y para ello es fundamental contar con una máquina más eficiente en el rendimiento.

Veamos otro sencillo ejemplo en el cual un vibroapisonador de menor eficiencia (la “máquina económica”) con una conservadora diferencia en el rendimiento de solo un 20 % (algo nada fuera de lo común) respecto del equipo algo más costoso pero a su vez más eficiente.

- Precio de compra del equipo “de alto rendimiento”, por ejemplo **US\$ 4.530**
- Precio de compra del equipo “económico”, por ejemplo **US\$ 3.970**
- Ventaja en el precio en el momento de la compra **US\$ 560**
- Costos laborales y adicionales por hora, por ejemplo **US\$ 43**
- Comparando los costos laborales totales con el déficit en el rendimiento del 20 %, tendremos una pérdida total por hora de trabajo de $43 \times 20/100 =$ **US\$ 8,60**
- Después de, $US\$ 560 / US\$ 8,60$ por hora = 65 horas de trabajo, la ventaja de US\$ 560, en el precio de compra, comparado a la pérdida por hora de trabajo de US\$8,60, sumará un total de **US\$ 0,-**
- Estimando un total de 300 horas de trabajo por año, la ventaja en el precio recién mencionada habrá desaparecido en aprox. un quinto (**1/5**) de las horas totales de trabajo por año.
- Al terminar el primer año de operaciones se habrá pagado por el “equipo económico” aproximadamente US\$ 2.200, más que para el equipo más costoso pero de mayor rendimiento.

Luego se hace evidente que, proceder a invertir en este caso una cantidad mayor produce ahorros reales. Pero veamos que ocurre si aterrizamos los valores a la realidad del país (por simplicidad trabajaremos en dólares).

- Precio de compra del equipo “de alto rendimiento”, por ejemplo **US\$ 4.530**
- Precio de compra del equipo “económico”, por ejemplo **US\$ 3.970**
- Ventaja en el precio en el momento de la compra **US\$ 560**
- Costos laborales y adicionales por hora, (en Chile) **US\$ 1.23**

- Comparando los costos laborales totales con el déficit en el rendimiento del 20 %, tendremos una pérdida total por hora de trabajo de $1.23 \times 20/100 =$
US\$ 0.24
- Después de, $US\$ 560/US\$ 0.24$ por hora = **2276** horas de trabajo, la ventaja de US\$ 560, en el precio de compra, comparado a la pérdida por hora de trabajo de US\$ 0.24, sumará un total de **US\$ 0,-**
- Estimando un total de 300 horas de trabajo por año, la ventaja en el precio recién mencionada habrá desaparecido en aprox. **siete años y medio**.

De esta forma queda en evidencia que invertir, aquí en Chile, en máquinas de alto rendimiento (alto precio también), no es siempre la mejor alternativa, ya que la tecnología avanzada en maquinaria de compactación u otra, se encuentra a precios prohibitivos en comparación a los ingresos de las personas u empresas.

¿ARRENDAR O COMPRAR?

El presente capítulo tiene como objetivo responder la pregunta del encabezamiento, ¿Hasta qué punto es conveniente arrendar la maquinaria de compactación?, ¿Cuándo deja de ser conveniente arrendar y se transforma en una mejor alternativa adquirir la máquina?.

Para responder estas interrogantes es necesario realizar comparaciones entre máquinas de la misma especie, ya sean planchas vibradoras, rodillos compactadores, etc. Luego es necesario situarse en el caso en el cual la máquina ha sido comprada y en el caso en el cual la máquina ha sido arrendada a alguna empresa dedicada al rubro. Se calculan los costos de operación (costos variables y costos fijos) para de acuerdo a un parámetro preestablecido que en este caso es la cantidad de metros cúbicos a compactar por estas máquinas, o sea su nivel de operación y, luego se procede a su comparación para así obtener los gráficos que luego se presentan .

Debido a la gran variedad de máquinas y modelos existentes en el mercado, resultaría poco práctico para los fines de esta tesis realizar comparaciones con toda la maquinaria existente, por otro lado sería además innecesario extendernos en realizar nuevamente el cálculo de los costos y rendimiento de nueva maquinaria; por lo anterior utilizaremos las mismas planchas vibradoras WACKER (DPU 2950H y DPU 6055). Sin embargo, en el anexo C se presentan las distintas alternativas de marcas y modelos existentes en el mercado. En dicho anexo se encuentran los datos técnicos y económicos suficientes para realizar los cálculos de rendimiento y costos de esa maquinaria, para poder así comparar y optar por la opción más conveniente.

Las tablas a continuación fueron diseñadas en planillas Excel las cuales contienen la misma metodología y fórmulas presentadas en el capítulo anterior para poder de esa manera calcular los rendimientos y costos unitarios de compactación. Los gráficos costos totales v/s cantidad de metros cúbicos se obtuvieron al ir

variando la cantidad de metros cúbicos en la planilla, esta variable es fundamental para obtener el nivel de operación a que será sometida la máquina y por lo tanto si es necesario arrendar o comprar la maquinaria; a continuación se presentan los valores correspondientes a compactar 100.000 metros cúbicos, un valor de referencia, ya que se podría haber utilizado cualquier otra cantidad, lo importante es que esta cantidad sea una estimación del nivel de operación a que será sometida la máquina en su vida útil, cantidad que puede ser muy diferente entre una empresa Constructora y otra.

Para determinar los costos operativos y el costo total se asumió que:

- 1) La expectativa de vida de las planchas vibradoras (en Chile) es de 6000 horas cada una.
- 2) Los costos de depreciación por hora de trabajo se determinaron al amortizar el precio de la máquina por las 6000 hrs de expectativa de vida.
- 3) Los costos de mantenimiento y reparaciones se han fijado en un 80 % de los costos de depreciación.
- 4) El precio del combustible diesel se ha estimado en \$ 250 por litro.
- 5) Los costos por mano de obra se han establecido en \$ 800 por hora.
- 6) Los precios de arriendo de las planchas según Empresa Indu-rent de Puerto Montt son para la plancha DPU 2950H y para la DPU 6055 de \$14.000 y \$20.000 (por día de arriendo) respectivamente, lo que da un precio por hora de trabajo de \$1.750 y \$2.500, respectivamente (si suponemos que un día de trabajo común es de 8 horas).
- 7) Al arrendar la máquina no existen gastos de depreciación ni mantenimiento.

A continuación se presentan las distintas alternativas posibles entre estas dos planchas vibradoras.

Posteriormente se incluirán todas las alternativas en una sola gráfica y realizaremos los comentarios y conclusiones correspondientes.

OPCION DE COMPRA v/s ARRIENDO DE LA PLANCHA DPU 2950H

		COMPRA	ARRIENDO
Peso de servicio	(kg)	192	192
Ancho de trabajo	(cm)	50	50
Fuerza centrífuga	(kn)	29	29
Profundidad de compactación	(cm)	30	30
Velocidad de avance	(m/min)	22	22
Rendimiento superficial	(m2/hr)	660	660
Rendimiento de compactación	(m3/hr)	198	198
Consumo de combustible	(l/hr)	1,2	1,2
Precio	(US\$)	6736	0
Precio en pesos	(\$)	\$ 4.354.420	\$ -
mts3 a compactar		100000	100000
n° de pasadas		3	3
Mano de obra	(\$/hr)	800	800

COSTOS POR HORA DE TRABAJO

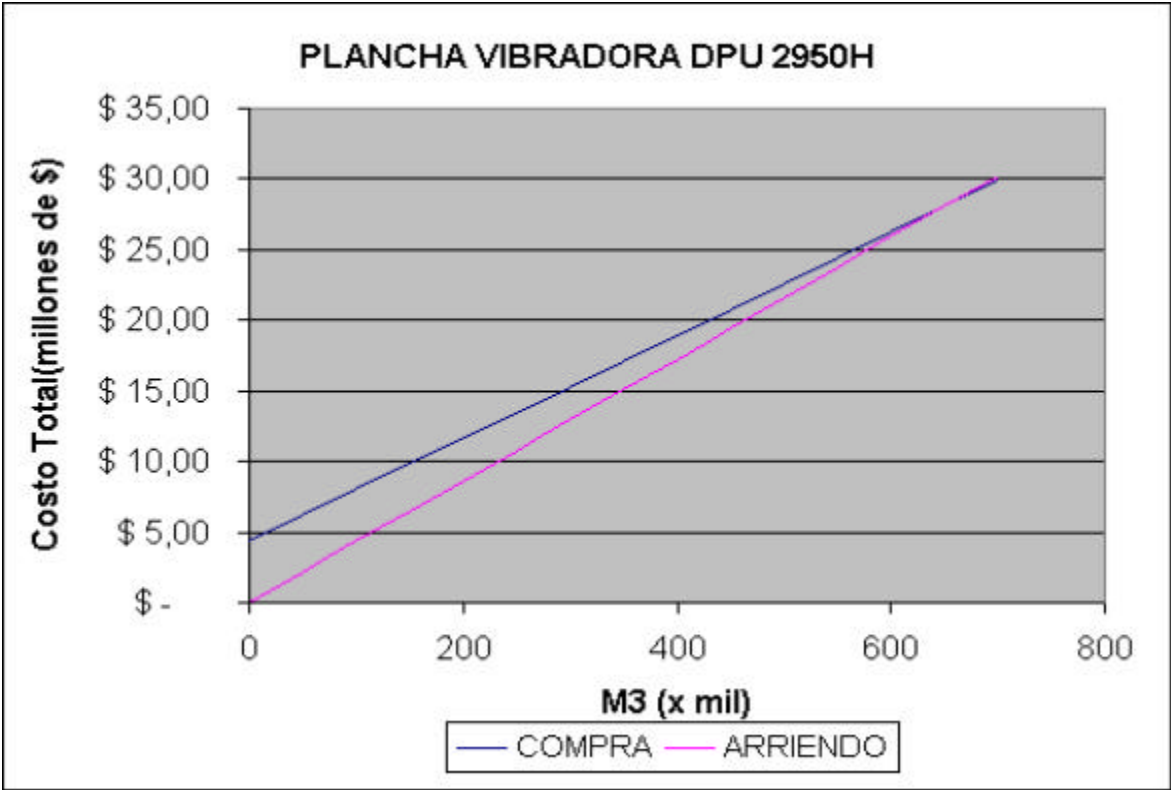
Costos de depreciacion	(\$/h)	725,74	0,00
Costos de mantenimiento y rep.	(\$/h)	580,59	0,00
Costo de arriendo por hora	(\$/h)	0,00	1750,00
Costo del combustible	(\$/h)	300,00	300,00
Mano de obra por hora	(\$/h)	800,00	800,00
Costo de la maquina por hora de trabajo	(\$/h)	\$ 2.406,33	\$ 2.850,00

COSTO TOTAL PARA EL TRABAJO

Tiempo requerido para la compactación	(hr)	1.515	1.515
Costo total para el trabajo de comp.	(\$)	\$ 3.645.948	\$ 4.318.182

DIFERENCIA(\$) \$ 672.233

En la gráfica puede verse que la plancha DPU 2950H es mas económico arrendarla hasta aprox. Los 650.000 mt³, luego es mas conveniente comprar la máquina.



OPCION DE COMPRA v/s ARRIENDO DE LA PLANCHA DPU 6055

		COMPRA	ARRIENDO
Peso de servicio	(kg)	478	478
Ancho de trabajo	(cm)	71	71
Fuerza centrífuga	(kn)	60	60
Profundidad de compactación	(cm)	50	50
Velocidad de avance	(m/min)	28	28
Rendimiento superficial	(m2/hr)	1193	1193
Rendimiento de compactación	(m3/hr)	596	596
Consumo de combustible	(l/hr)	2,2	2,2
Precio	(US\$)	12.634	0
Precio en pesos	(\$)	\$ 8.167.123	\$ -
mts3 a compactar		100000	100000
n° de pasadas		3	3
Mano de obra	(\$/hr)	800	800

COSTOS POR HORA DE TRABAJO

Costos de depreciación	(\$/h)	1361,19	0,00
Costos de mantenimiento y rep.	(\$/h)	1088,95	0,00
Costo de arriendo por hora	(\$/h)	0,00	2500,00
Costo del combustible	(\$/h)	550,0	550,00
Mano de obra por hora	(\$/h)	800,00	800,00
Costo de la máquina por hora de trabajo	(\$/h)	\$ 3.800,14	\$ 3.850,00

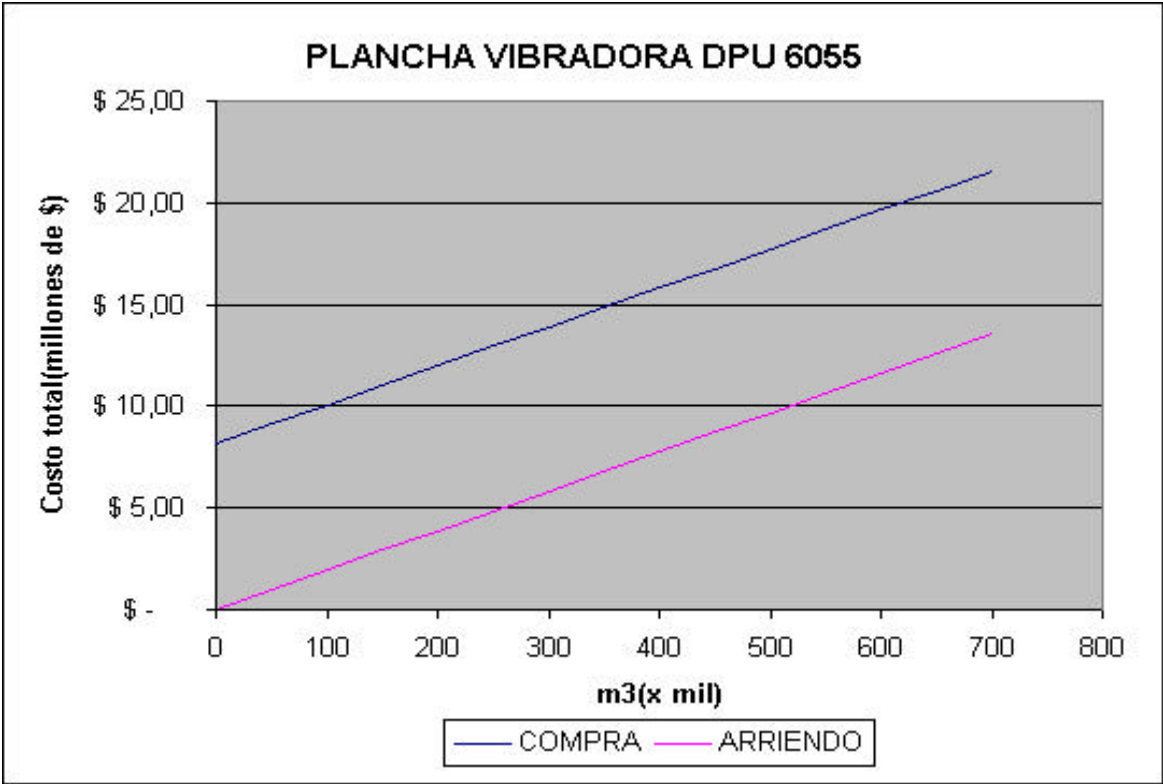
COSTO TOTAL PARA EL TRABAJO

Tiempo requerido para la compactación	(hr)	503	503
Costo total para el trabajo de comp.	(\$)	\$ 1.911.538	\$ 1.936.620

DIFERENCIA

\$ 25.082

En la gráfica se puede apreciar que el arriendo de esta plancha siempre es mas conveniente que la Compra, ya que la intersección de las curvas ocurre en aprox. los 32.000.000 de mts3.



OPCIONES DE COMPRA DE LAS PLANCHAS DPU 2950H v/s DPU 6055

		DPU 2950H	DPU 6055
Peso de servicio	(kg)	192	478
Ancho de trabajo	(cm)	50	71
Fuerza centrífuga	(kn)	29	60
Profundidad de compactación	(cm)	30	50
Velocidad de avance	(m/min)	22	28
Rendimiento superficial	(m2/hr)	660	1193
Rendimiento de compactación	(m3/hr)	198	596
Consumo de combustible	(l/hr)	1,2	2,2
Precio	(US\$)	6.736	12.634
Precio en pesos	(\$)	\$ 4.354.420	\$ 8.167.123
mts3 a compactar		100000	100000
n° de pasadas		3	3
Mano de obra	(\$/hr)	800	800

COSTOS POR HORA DE TRABAJO

Costos de depreciación	(\$/h)	725,74	1361,19
Costos de mantenimiento y rep.	(\$/h)	580,59	1088,95
Costo de arriendo por hora	(\$/h)	0,00	0
Costo del combustible	(\$/h)	300,00	550,00
Mano de obra por hora	(\$/h)	800,00	800,00
Costo de la maquina por hora de trabajo	(\$/h)	\$ 2.406,33	\$ 3.800,14

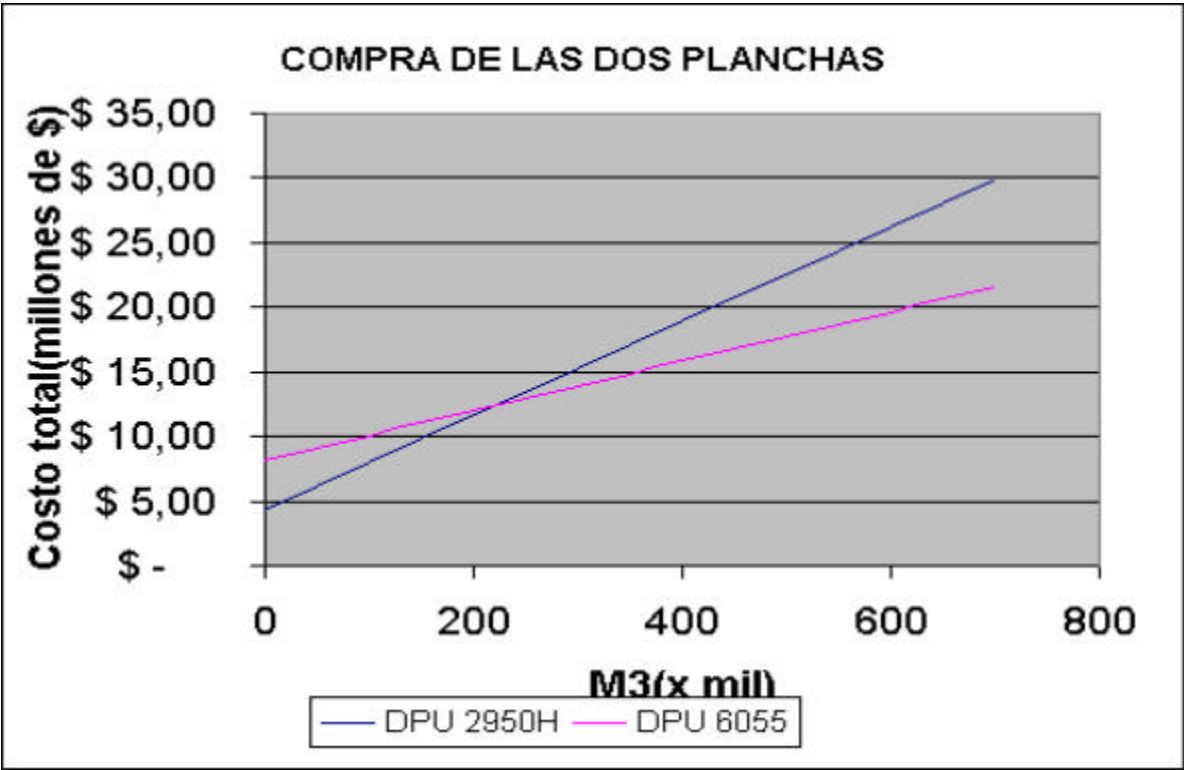
COSTO TOTAL PARA EL TRABAJO

Tiempo requerido para la compactación	(hr)	1515	503
Costo total para el trabajo de comp.	(\$)	\$ 3.645.948	\$ 1.911.538

DIFERENCIA

\$ 1.734.411

En la gráfica se puede apreciar que hasta los 220.000 mts3 es más conveniente la utilización de la Plancha DPU 2950H, luego es mas conveniente la plancha DPU 6055.



OPCIONES DE ARRIENDO DE LAS MAQUINAS DPU 2950H v/s DPU 6055

		DPU 2950H	DPU 6055
Peso de servicio	(kg)	192	478
Ancho de trabajo	(cm)	50	71
Fuerza centrífuga	(kn)	29	60
Profundidad de compactación	(cm)	30	50
Velocidad de avance	(m/min)	22	28
Rendimiento superficial	(m2/hr)	660	1193
Rendimiento de compactación	(m3/hr)	198	596
Consumo de combustible	(l/hr)	1,2	2,2
Precio	(US\$)	0	0
Precio en pesos	(\$)	\$ -	\$ -
mts3 a compactar		100000	100000
n° de pasadas		3	3
Mano de obra	(\$/hr)	800	800

COSTOS POR HORA DE TRABAJO

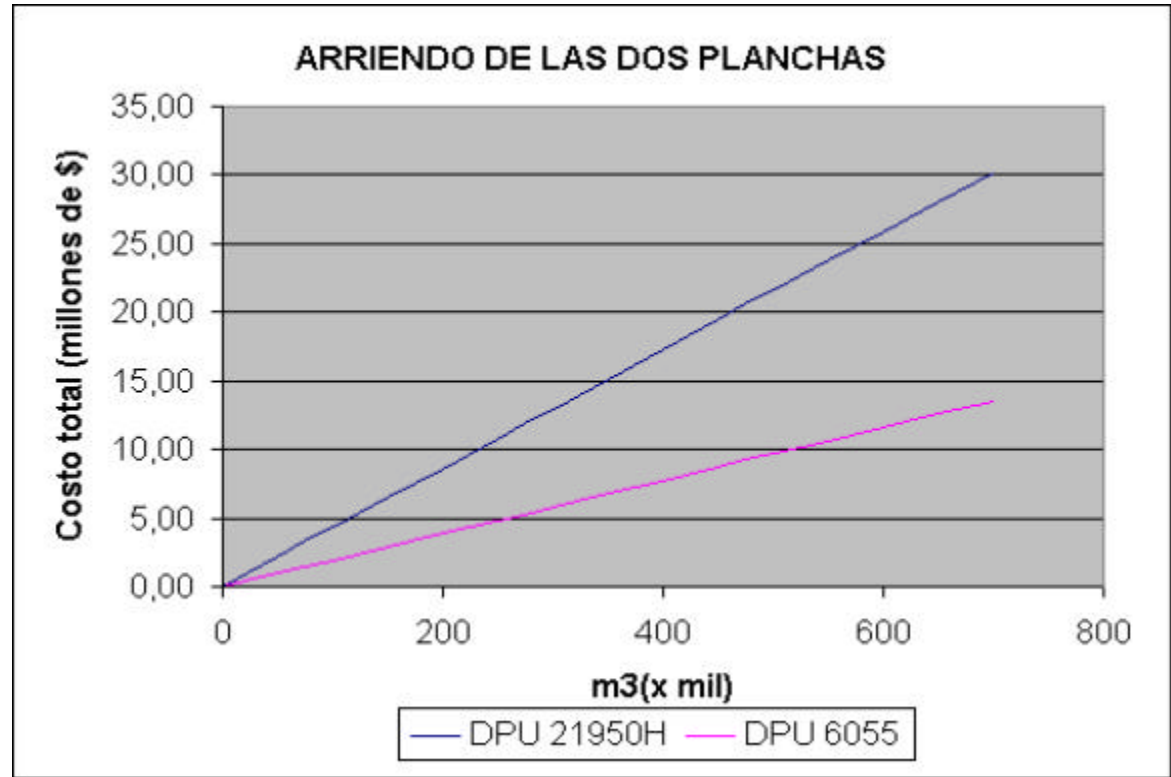
Costos de depreciación	(\$/h)	0,00	0,00
Costos de mantenimiento y rep.	(\$/h)	0,00	0,00
Costo de arriendo por hora	(\$/h)	1750,00	2500
Costo del combustible	(\$/h)	300,00	550,00
Mano de obra por hora	(\$/h)	800,00	800,00
Costo de la maquina por hora de trabajo	(\$/h)	\$ 2.850,00	\$ 3.850,00

COSTO TOTAL PARA EL TRABAJO

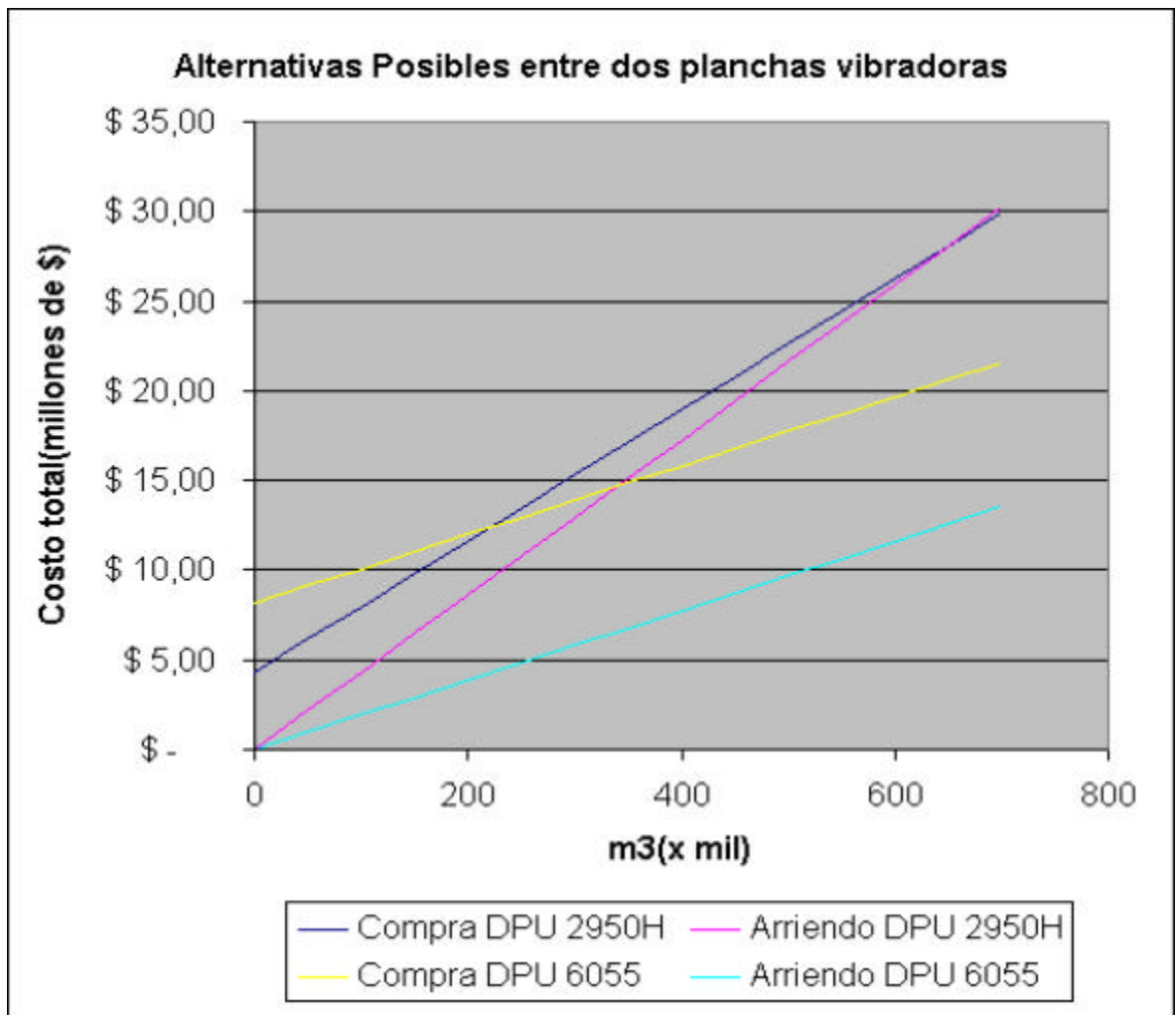
Tiempo requerido para la compactación	(hr)	1515	503
Costo total para el trabajo de comp.	(\$)	\$ 4.318.182	\$ 1.936.620

DIFERENCIA	\$ 2.381.562
------------	--------------

En La gráfica puede apreciarse que el arriendo de la plancha DPU 6055 siempre es mas conveniente que el arriendo de la plancha DPU 2950H.



CONCLUSIONES



Como se ha visto claramente en las gráficas, el nivel de operación, o sea la cantidad de metros cúbicos es la variable principal, ya que es la que permite acotar los rangos de operación en que es mas rentable una modalidad que otra (arriendo o compra).

Los gráficos permiten apreciar por ejemplo que para un nivel moderado a bajo de uso, la alternativa más conveniente es el arriendo de las máquinas, sin embargo, existe una alternativa que es más conveniente que las otras, el arriendo de la máquina DPU 6055, lo cuál nos puede llevar a la conclusión que lo mas rentable es arrendar una máquina de alto rendimiento, antes que una de bajo rendimiento pero también con precio de arriendo más barato. Lo anterior no significa que con otro tipo o modelo de máquinas ocurra lo mismo, ya que los precios de arriendo y el

rendimiento pueden variar y sería otra la situación; esto nos obliga a tener que estudiar cada caso en específico y no generalizar los estudios que se han realizado para otras máquinas.

Finalmente, podemos decir que para comprar una máquina de compactación y esperar una rentabilidad positiva de esa elección, el nivel de operación a que será sometida la máquina deberá ser bastante alto (en algunos casos demasiado tal como muestran las gráficas) de manera que se logre recuperara el capital invertido.

En el siguiente capítulo nos referiremos al caso no muy común en que es conveniente comprar, y las alternativas de financiamiento.

ESTUDIO FINANCIERO

El desarrollo de este capítulo esta destinado a entregar una ayuda para poder discernir la mejor forma de financiamiento para la adquisición de la máquina, en el caso de que sea rentable su adquisición debido al alto nivel de operación a que será sometida la máquina, esto se analizó en las páginas anteriores donde era necesario realizar estudios más bien técnicos en los que se determinaba el rendimiento de la máquina, sus costos de operación, que tipo de máquina es la que se acomoda mejor al tipo de trabajos realizados, etc. Y por otro lado, lo que es mas importante si de acuerdo al nivel de operación a que se someterá la máquina dejó de ser una alternativa rentable el arrendar y es mejor alternativa adquirir la máquina, o sea, antes de llegar a esta instancia la persona encargada de la decisión de inversión ya debe saber que tipo de máquina de compactación y que modelo es el más adecuado para el uso al que piensa someter la máquina.

TIPOS DE FINANCIAMIENTO

En el mercado financiero existen tres tipos de financiamiento posible:

- Compra al contado
- Compra vía Leasing
- Compra mediante un Crédito Bancario

Lo que haremos será analizar cada uno de ellos situándonos en un caso hipotético en el cual la máquina elegida, ya que es mas rentable por su rendimiento y la gran cantidad de metros cúbicos a compactar, es la plancha vibradora DPU 2950H de la empresa Wacker.

Para realizar el análisis de rentabilidad es necesario aplicar ciertos índices de rentabilidad, tales como el VAN, el TIR, el período de retorno, etc. Para utilizar estos índices es necesario obtener los flujos de caja netos que va a generar la maquinaria en su producción (ingresos menos costos), lo cual en este caso no es tan simple de aplicar, ya que no existen ingresos en relación a la compactación. Después de

investigar el tema y gracias a la ayuda de un evaluador de proyectos (Ingeniero Comercial) y un Contador Auditor, llegamos a la conclusión de lo que se podía realizar era hacer los cálculos con los flujos de caja netos generados entre la alternativa de compra (costos operacionales) y la alternativa de arrendamiento. Lo anterior significa que se genera un ahorro entre arrendar la maquinaria (que cuesta mas caro) y ,tener su maquinaria propia en la que se pagan solamente los costos de operación (resulta más económico que arrendar).

Los cálculos realizados a continuación se obtuvieron de la misma forma que en el capítulo anterior en una planilla Excel, en la cual es necesario ingresar ciertos datos como son: el precio neto de la máquina, el nivel de operación por año (metros cúbicos por año), la vida útil de la máquina, el ancho de trabajo (en cm), la profundidad de compactación de la máquina, la velocidad de avance, el consumo de combustible, etc. Todos estos datos se pueden encontrar en los catálogos técnicos de estas. Junto con los datos anteriores es necesario agregar el precio de la mano de obra (\$/hr) y el costo de arriendo por hora; una vez ingresados los datos la planilla genera los cálculos de rendimiento (tal como se vio en los capítulos anteriores) y los flujos netos de la máquina (la compra en relación al arrendamiento) en relación al número de años que será útil la máquina.

Como puede verse hasta ahora los cálculos, fórmulas y explicaciones se pueden utilizar indistintamente para cualquier tipo de máquina, ya sean rodillos, vibroapisonadores o planchas vibratoras, como en el presente caso. Es importante destacar que el objetivo de este trabajo no es reglamentar rígidamente las decisiones de inversión de maquinaria de compactación, sino mas bien mostrar la forma en que afectan las distintas variables que están en relación con el caso. Por otro lado, sería imposible realizar una pauta rígida para esta tipo de decisiones, ya que cada empresa se desenvuelve en situaciones diferentes que requieren ser analizadas, en particular para así poder estar seguro de haber tomado la mejor decisión. Por la

razón anterior el trabajo procura considerar todas las variables posibles para una correcta decisión, sin embargo es bueno hacer notar que las cantidades utilizadas correspondientes al nivel de operación (metros cúbicos a compactar) no representan necesariamente los de una empresa en especial, ya que la modificación de ésta no cambia la metodología aquí explicada para una correcta decisión de inversión. Por otro lado, sería imposible utilizar un nivel de operación que represente a todas las empresas, ya que todas tienen distintos niveles de operación.

COMPRA AL CONTADO

Esta opción de compra es poco utilizada por las Empresas Constructoras, ya que disminuye su capacidad Crediticia además de disminuir el muy necesario capital de trabajo; incluyo esta opción para así poder apreciar mejor el comportamiento de las distintas alternativas de financiamiento. Y poder así optar por la mas adecuada. A continuación se presenta la metodología de cálculo simplificado, ya que encuentro innecesario volver a realizar todas las tablas de cálculos para obtener el rendimiento y costos por hora de trabajo que ya calculamos en el capítulo IX.

Los flujos se obtuvieron al comparar los costos relacionados con la compra al contado (incluido los beneficios tributarios correspondientes, los cuales corresponden a un 16 % de la depreciación de la plancha vibradora) contra los costos en el caso de que se arriende la plancha DPU 2950H, el arriendo también esta afecto a los beneficios tributarios por el pago de arriendo (16 %),pero en este caso no existen los costos de depreciación ni costos por mantenimiento de la maquinaria. Lo anterior se podrá apreciar mejor en la siguiente tabla en la que se calculará la rentabilidad de esta opción con el índice del Valor Actual Neto.

Análisis de la opción compra al Contado de Plancha vibradora DPU 2950H

Precio neto	\$	4.354.420
Nivel de operación por año (m3/año)		66000
Vida útil de la maquina (hrs)		6000
Ancho de trabajo (cm)		50
Profundidad de compactación (cm)		30
Velocidad de avance (m/min)		22
Consumo de Combustible (lt/hr)		1,2
n° de pasadas		3
Mano de Obra (\$/hr)	\$	800
Arriendo por hora (\$)	\$	1.750
Rendimiento de compactación (m3/hr)		66
n° de años que sirve la máquina		6,0

AÑOS	0	1	2	3	4	5	6
<u>COMPRA (al contado)</u>							
Inversión	-\$ 4.354.420						
Costo por depreciación		-\$ 725.737	-\$ 725.737	-\$ 725.737	-\$ 725.737	-\$ 725.737	-\$ 725.737
Costo por mantenimiento		-\$ 580.589	-\$ 580.589	-\$ 580.589	-\$ 580.589	-\$ 580.589	-\$ 580.589
Costo de combustible		-\$ 300.000	-\$ 300.000	-\$ 300.000	-\$ 300.000	-\$ 300.000	-\$ 300.000
Costo por mano de obra		-\$ 800.000	-\$ 800.000	-\$ 800.000	-\$ 800.000	-\$ 800.000	-\$ 800.000
Beneficio tributario de la depreciacion		\$ 116.118	\$ 116.118	\$ 116.118	\$ 116.118	\$ 116.118	\$ 116.118
Flujos de la máquina comprada	-\$ 4.354.420	-\$ 2.290.208	-\$ 2.290.208	-\$ 2.290.208	-\$ 2.290.208	-\$ 2.290.208	-\$ 2.290.208
<u>ARRIENDO</u>							
Costo por arriendo		-\$ 1.750.000	-\$ 1.750.000	-\$ 1.750.000	-\$ 1.750.000	-\$ 1.750.000	-\$ 1.750.000
Costo de Combustible		-\$ 300.000	-\$ 300.000	-\$ 300.000	-\$ 300.000	-\$ 300.000	-\$ 300.000
Costo por mano de obra		-\$ 800.000	-\$ 800.000	-\$ 800.000	-\$ 800.000	-\$ 800.000	-\$ 800.000
Beneficio tributario por el arriendo		\$ 280.000	\$ 280.000	\$ 280.000	\$ 280.000	\$ 280.000	\$ 280.000
Flujos de la máquina arrendada	\$ -	-\$ 2.570.000	-\$ 2.570.000	-\$ 2.570.000	-\$ 2.570.000	-\$ 2.570.000	-\$ 2.570.000
FLUJOS TOTALES(compra v/s arriendo)	-\$ 4.354.420	\$ 279.792	\$ 279.792	\$ 279.792	\$ 279.792	\$ 279.792	\$ 279.792

VAN	-\$ 2.860.787
------------	----------------------

COMPRA VIA LEASING

Esta es una alternativa de financiamiento que se ha masificado bastante en los últimos años, consiste básicamente en un contrato de arriendo con opción de compra, es decir, la persona o empresa va pagando cuotas mensuales calculadas por el banco previa presentación de la factura pro forma del bien a adquirir, y en el momento de cancelar la última cuota el banco o empresa financiera le traspasa el bien a la persona o empresa con la cuál firmó el contrato.

Este sistema tiene ventajas como por ejemplo:

- Financiamiento de mediano y largo plazo de hasta el 100 % del valor del bien.
- Protege el capital y no afecta la capacidad crediticia o de endeudamiento de la empresa, por cuanto, durante su período de pago se trata solo como un arrendamiento.
- Disminuye el impacto tributario al aumentar el gasto y así reducir la base imponible de impuesto a la renta.
- Permite no desviar capital de trabajo de corto plazo (máximo 1 año), generalmente escaso, a compras de activo fijo de largo plazo.
- El contrayente puede empezar a pagar la cuota de arriendo cuando el equipo ya esté produciendo.

Para realizar el análisis de ésta opción me contacté con la Empresa Santiago Leasing, la cual me cotizó lo siguiente:

Cantidad	Descripción del bien	Tipo de Compra	Moneda	Valor Unitario	Total
1	Plancha vibradora DPU 2950H	Nacional	US \$ Obs.	6.736	6.736,00

Alternativa	N° de cuotas	Tipo Cuota	Moneda	Valor
1	36	Arriendo	U.F.	9,61
1	1	Opción de Compra	U.F.	9,61

Los valores antes señalados no incluyen IVA.

Las rentas antes mencionadas consideran la totalidad de los gastos involucrados en la operación, incluidos seguros, impuestos y gastos de administración del contrato. Los montos de pago mensuales han sido anualizados a valor futuro con una tasa del 1% mensual, con lo cual se obtiene un pago total por año de \$1.981.715 los tres primeros años, tal como se puede apreciar en la siguiente tabla.

Análisis de la opción compra Vía Leasing de Plancha vibradora DPU 2950H

Precio neto	\$	4.354.420
Nivel de operación por año (m3/año)		66000
Vida útil de la maquina (hrs)		6000
Ancho de trabajo (cm)		50
Profundidad de compactación (cm)		30
Velocidad de avance (m/min)		22
Consumo de Combustible (lt/hr)		1,2
n° de pasadas		3
Mano de Obra (\$/hr)	\$	800
Arriendo por hora (\$)	\$	1.750
Rendimiento de compactación (m3/hr)		66
n° de años que sirve la máquina		6,0

AÑOS	0	1	2	3	4	5	6
<u>COMPRA(via Leasing)</u>							
Cuotas del Leasing (pagos anuales)		-\$ 1.981.715	-\$ 1.981.715	-\$ 1.981.715			
Costo por mantenimiento		-\$ 580.589	-\$ 580.589	-\$ 580.589	-\$ 580.589	-\$ 580.589	-\$ 580.589
Costo de combustible		-\$ 300.000	-\$ 300.000	-\$ 300.000	-\$ 300.000	-\$ 300.000	-\$ 300.000
Costo por mano de obra		-\$ 800.000	-\$ 800.000	-\$ 800.000	-\$ 800.000	-\$ 800.000	-\$ 800.000
Beneficio tributario sobre las cuotas		\$ 317.074	\$ 317.074	\$ 317.074			
Flujos de la maquina comprada	\$ -	-\$ 3.345.230	-\$ 3.345.230	-\$ 3.345.230	-\$ 1.680.589	-\$ 1.680.589	-\$ 1.680.589
<u>ARRIENDO(fijo por hora)</u>							
Costo por arriendo		-\$ 1.750.000	-\$ 1.750.000	-\$ 1.750.000	-\$ 1.750.000	-\$ 1.750.000	-\$ 1.750.000
Costo de Combustible		-\$ 300.000	-\$ 300.000	-\$ 300.000	-\$ 300.000	-\$ 300.000	-\$ 300.000
Costo por mano de obra		-\$ 800.000	-\$ 800.000	-\$ 800.000	-\$ 800.000	-\$ 800.000	-\$ 800.000
Beneficio tributario por el arriendo		\$ 280.000	\$ 280.000	\$ 280.000	\$ 280.000	\$ 280.000	\$ 280.000
Flujos de la máquina arrendada	\$ -	-\$ 2.570.000	-\$ 2.570.000	-\$ 2.570.000	-\$ 2.570.000	-\$ 2.570.000	-\$ 2.570.000
FLUJOS TOTALES(compra v/s arriendo)	\$ -	-\$ 775.230	-\$ 775.230	-\$ 775.230	\$ 889.411	\$ 889.411	\$ 889.411

VAN	-\$ 304.872
------------	--------------------

CREDITOS BANCARIOS

Estos créditos son una alternativa de financiamiento intermedia entre la compra al contado y la opción de adquirir vía Leasing.

Permite desviar a la compra solo montos de capital de trabajo razonables y/o posibles, que no afectan la liquidez y/o solvencia de la Empresa y, por otra parte, contraer crédito bancario solo por la parte faltante del valor de la inversión, a tasa de interés de mercado, evitando la mayor carga financiera por utilidad de la Empresas de Leasing, y el sobrecargo de intereses que lo aplican sobre el valor total del bien.

Para el caso en estudio opté por un crédito a 6 años plazo y de vencimiento anual con UF + 10,1 % , crédito con una tasa de interés promedio de acuerdo al mercado financiero.

Análisis de opción compra con Crédito de Plancha vibradora DPU 2950H

Precio neto	\$	4.354.420
Nivel de operación por año (m3/año)		66000
Vida útil de la maquina (hrs)		6000
Ancho de trabajo (cm)		50
Profundidad de compactación (cm)		30
Velocidad de avance (m/min)		22
Consumo de Combustible (lt/hr)		1,2
n° de pasadas		3
Mano de Obra (\$/hr)	\$	800
Arriendo por hora (\$)	\$	1.750
Rendimiento de compactación (m3/hr)		66
n° de años que sirve la máquina		6,0

AÑOS	0	1	2	3	4	5	6
<u>COMPRA(Credito Bancario)</u>							
Pago de Capital		-\$ 562.942	-\$ 619.799	-\$ 682.399	-\$ 751.321	-\$ 827.205	-\$ 910.753
Pago de Intereses		-\$ 439.796	-\$ 382.939	-\$ 320.340	-\$ 251.417	-\$ 175.534	-\$ 91.986
Costos de operación de la maquina		-\$ 2.406.326	-\$ 2.406.326	-\$ 2.406.326	-\$ 2.406.326	-\$ 2.406.326	-\$ 2.406.326
Beneficio tributario de los intereses		\$ 70.367	\$ 61.270	\$ 51.254	\$ 40.227	\$ 28.085	\$ 14.718
Beneficio tributario de la depreciacion		\$ 116.118	\$ 116.118	\$ 116.118	\$ 116.118	\$ 116.118	\$ 116.118
Flujos de la maquina comprada	\$ -	-\$ 3.222.579	-\$ 3.231.677	-\$ 3.241.692	-\$ 3.252.720	-\$ 3.264.861	-\$ 3.278.229
<u>ARRIENDO(fijo por hora)</u>							
Costo por arriendo		-\$ 1.750.000	-\$ 1.750.000	-\$ 1.750.000	-\$ 1.750.000	-\$ 1.750.000	-\$ 1.750.000
Costo de Combustible		-\$ 300.000	-\$ 300.000	-\$ 300.000	-\$ 300.000	-\$ 300.000	-\$ 300.000
Costo por mano de obra		-\$ 800.000	-\$ 800.000	-\$ 800.000	-\$ 800.000	-\$ 800.000	-\$ 800.000
Beneficio tributario por el arriendo		\$ 280.000	\$ 280.000	\$ 280.000	\$ 280.000	\$ 280.000	\$ 280.000
Flujos de la máquina arrendada	\$ -	-\$ 2.570.000	-\$ 2.570.000	-\$ 2.570.000	-\$ 2.570.000	-\$ 2.570.000	-\$ 2.570.000
FLUJOS TOTALES(compra v/s arriendo)	\$ -	-\$ 652.579	-\$ 661.677	-\$ 671.692	-\$ 682.720	-\$ 694.861	-\$ 708.229

VAN	-\$ 2.477.872
-----	----------------------

ANÁLISIS

Si bien es cierto que el VAN de las 3 opciones es negativo

- Compra VAN = -\$2.860.787
- Leasing VAN = -\$304.872
- Crédito bancario VAN = -\$2.477.872

Se puede observar que la opción menos negativa es el Leasing, esto en parte se puede explicar debido a que no hay costos por depreciación de la máquina, ya que ésta se encuentra arrendada. Por otro lado, existe un mayor beneficio Tributario debido a las altas cuotas del Leasing los tres primeros años.

Lo anterior nos lleva a la conclusión que en caso de querer comprar la plancha vibradora, lo cual no es recomendable por el bajo nivel de operación (ver pág. 108), la alternativa mas adecuada es adquirir la máquina mediante un Leasing.

Existe otro beneficio asociado a esta modalidad y es que la cuarto año, por una cuota muy baja se puede adquirir la plancha, lo cual es muy bueno, ya que se obtiene una máquina que puede estar en muy buenas condiciones después de sólo tres años de uso.

ANEXO A

RECOMENDACIONES GENERALES SOBRE EL TRABAJO DE COMPACTACION

Se recomienda equipar el plantel de máquinas con un número suficiente de equipos como para poder permitir – de acuerdo al trabajo a efectuar – una asignación fija de una o mas máquinas a cada grupo o cuadrilla de obreros individual. La experiencia muestra que el menor número de fallas ocurre en aquellas obras en las cuales cada grupo o cuadrilla tiene asignada una o mas maquinas, siendo al mismo tiempo responsables por el correcto funcionamiento del equipo. En el interés de buenas ganancias, especialmente cuando el grupo o la cuadrilla trabaja a “trato” y cuando los resultados dependen de la disponibilidad y el buen funcionamiento de la máquina asignada a ellos, ocurren verdaderos milagros en lo que concierne a la durabilidad, rendimiento y el almacenamiento a prueba de robos fuera de las horas de trabajo. Justamente también en este tipo de situación el personal mismo se ocupa de efectuar el mantenimiento y servicio en forma consecuente y regular.

Es así como en casi toda obra de construcción se podrán encontrar equipos de compactación de todo tipo de tamaños y para los usos más variados. Todos estos equipos deberían estar en uso continuo y en todos lados para evitar posibles asentamientos posteriores en, por ejemplo, zanjas para tuberías de servicios restituidas.

Desgraciadamente esto no siempre es el caso; la cantidad de fallas y daños por causa de asentamientos es considerable. No obstante las técnicas de compactación altamente desarrolladas, hundimientos en los pavimentos de calles o aceras, grietas en las fundaciones de edificios y paredes o superficies ocurren a diario.

En general la compactación de zanjas se inicia una vez terminados el resto de los trabajos. Ya que no queda mucho tiempo el resto de los trabajos deberán ser

“apurados”. Las zonas angostas, confinadas son gustosamente omitidas o pasadas por alto y la superficie de la zanja muchas veces es alisada rápidamente con una maquina con neumáticos tal como por ejemplo una maquina cargadora frontal, una retroexcavadora, un camión o cualquier otro vehículo de la obra. Zonas inaccesibles y esquinas son superficialmente apisonadas con el pie. Estas soluciones improvisadas son rápidamente llevadas a cabo, la compactación básicamente queda en la nada y futuros asentamientos o hundimientos podrán ser prácticamente garantizados.

La compactación de las zanjas se torna especialmente problemática. La falta de lugar, la humedad o el polvo, además de las condiciones de trabajo por lo general bastante sucias debido al material proveniente de las paredes plantean un problema para el operario en las zanjas estrechamente confinadas. ¿Quién no trataría de omitir una o dos pasadas con el equipo de compactación? – a menos que, naturalmente, la plancha vibradora o el rodillo haya sido equipado con un control remoto a cable o a rayos infrarrojos.

Muchas veces la razón que conduce a una compactación defectuosa es la falta de conocimientos sobre el proceso de compactación o también, alternativamente, la falta de información sobre la interacción entre el material a ser compactado y el equipo en uso.

Justamente en estos casos es muy importante que un operario entrenado se ocupe de esta parte del trabajo, especialmente en obras pequeñas en las cuales, por lo general, no se miden ni controlan los valores de la compactación. Este operario deberá estar lo suficientemente entrenado respecto a la altura correcta de la capa y el numero de pasadas requerido en correspondencia del material a ser compactado. Cursos de entrenamiento y capacitación, llevados a cabo dentro de las mismas empresas de construcción o, por otro lado, externamente en por ejemplo escuelas

patrocinadas por los gremios de construcción, serian la solución ideal para eliminar este tipo de falta en la calidad de trabajo.

Medidas útiles y significativas para una optimización del proceso de compactación podrían ser

- El tamaño del relleno deberá estar formado por una mezcla bien graduada compuesta de partículas de diferentes tamaños, es decir con una curva de distribución granulométrica bastante plana.
- El material de relleno deberá ser humedecido en forma pareja – pero no excesiva – y llevado lo mas cerca posible al contenido optimo de humedad. El agua actúa como un lubricante y facilita por ende la redistribución de las partículas individuales del material suelo.
- La altura de las capas individuales deberá ser lo más reducida posible. En capas de mayor altura habrá por cierto una cierta compactación en las zonas inferiores, sin lograrse sin embargo en todos los casos la densidad Proctor requerida.
- No se deberá transitar con vehículos por tramos definidos por encima de la capa recién colocada. Se deberá prestar atención de circular en forma pareja por toda la superficie si el material de relleno va a ser distribuido y reubicado por medio de maquinas niveladoras.
- Antes de proceder con la compactación de una nueva capa la misma deberá ser “aplanada o alisada” lo mejor posible. Con ello se podrán evitar posibles depresiones que no podrán ser alcanzadas con el equipo de compactación.
- La colocación de las capas de material de relleno y la compactación deberán ser efectuadas, dentro de lo posible, con condiciones climáticas secas.
- Siempre efectuar – según la zona a compactar – un alto un alto numero de pasadas con el equipo de compactación mas pesado y poderoso.

- No emplear personal inexperto sino solo personal correctamente entrenado y calificado
- Controlar intensivamente la densidad de compactación de las zonas en donde se ha procedido a efectuar la compactación.

ANEXO B

INFORMACIONES GENERALES SOBRE EL MANTENIMIENTO DE EQUIPOS PARA LA COMPACTACION DE SUELOS

Los equipos de compactación de suelos trabajan casi exclusivamente en zonas de mucho polvo. Por esta razón es de suma importancia un mantenimiento correcto del equipo, para garantizar, entre otros, una larga vida útil y la durabilidad del equipo. La falta de mantenimiento o un mantenimiento deficiente conducen, por lo general, a averías, roturas y/o un desgaste prematuro del equipo. La persona a cargo de un equipo de compactación diariamente deberá llevar a cabo un mantenimiento mínimo del equipo a su cuidado.

Cabe señalar que cada fabricante redacta un manual con instrucciones de servicio para sus equipos. Este manual incluye en sus varios capítulos datos sobre las medidas de seguridad a ser respetadas durante el uso del equipo, instrucciones respecto al manejo del equipo y a su mantenimiento. El manual forma parte del volumen de entrega de todas y cada una de las máquinas. Los trabajos de mantenimiento más importantes a ser llevados a cabo por el operario en sus vibroapisonadores, planchas o rodillos vibratorios mencionados en los capítulos anteriores, se detallan a continuación.

1. Vibroapisonadores

- Antes de arrancar el vibroapisonador se deberá controlar si todos los dispositivos de seguridad, por ejemplo la chapa lateral protectora para el carburador o la chapa protectora contra quemaduras del escape, estén correctamente montados y firmemente fijados o atornillados.
- Es conveniente llenar el tanque de combustible del equipo antes del primer arranque del día. De esta forma es posible evitar que el combustible tome contacto con partes calientes del motor. Favor de no fumar durante esta tarea.

- El peor enemigo de un motor a combustión interna es el siempre presente polvo. Por ello es de suma importancia que el elemento del filtro de aire sea inspeccionado y limpiado al menos una vez por día o, si fuera necesario, reemplazado por uno nuevo.

Resortes de fijación débiles o desgastados y una protección de filtro dañada – alternativamente, un filtro ovalado con carcasa o tapa dañada – deberán ser reemplazados.

- Nunca haga funcionar el equipo sin su filtro de aire.
- Filtros de combustible sucios impiden el flujo libre del combustible. Como consecuencia el motor del vibroapisonador marcha en forma irregular o se detiene completamente. Para garantizar un perfecto funcionamiento del motor utilice solo repuestos auténticos y originales.
- Se recomienda remover y limpiar a fondo al menos una vez al año aquellos tanques de combustible que incorporan en su interior un filtro de combustible, ya que todos los residuos retenidos por el filtro quedan en el fondo del tanque mismo.
- También el sistema de apisonado requiere lubricación. Controle el nivel de aceite del sistema de apisonado antes de arrancar el motor. Para este fin algunos fabricantes han equipado sus vibroapisonadores con una mirilla de aceite. En este caso, simplemente incline el vibroapisonador un poco hacia atrás hasta llegar a la posición vertical (perpendicular) para luego observar si hay aceite en el sistema.
- Controle diariamente si el fuelle pierde aceite o si ha sido dañado en la parte exterior. En caso de una pérdida de aceite en la parte superior o inferior se deberá ajustar la abrazadera correspondiente. Si el fuelle estuviera dañado se le deberá reemplazar inmediatamente para evitar daños mayores en el interior del sistema de apisonado.

- Se deberán reajustar todas las conexiones roscadas aprox. 8 horas después de la primera puesta en marcha. Además se recomienda controlar una vez por semana el correcto ajuste de las conexiones roscadas del pisón y las conexiones con juntas.
- Manténgase siempre en estado limpio al apisonador. Lavarlo si fuera necesario.

2. Planchas vibratoras

- Controle diariamente para verificar si todos los dispositivos de seguridad, por ejemplo la chapa protectora contra quemaduras del escape, el armazón de protección, la tapa cubre correa, etc. Se encuentran correctamente montados y firmemente fijados o atornillados.
- Reaprovisionar la plancha vibradora con el combustible correcto antes del primer arranque del DIA dentro de lo posible. Favor de no fumar durante esta tarea.
- Controlar diariamente el filtro de aire, tal como fuera el caso con el vibroapisonador, y como sigue:
 - En el caso del filtro de aire en baño de aceite se deberá controlar el nivel y el estado de limpieza del aceite.
 - En el caso del filtro de aire seco se deberán efectuar los trabajos de mantenimiento indicado en el manual con instrucciones de servicio del fabricante, sin olvidar de reemplazar el filtro cuando sea necesario.
 - Nunca haga funcionar el equipo sin su filtro de aire.
- Controle diariamente, y antes de arrancar el motor el nivel de aceite del mismo y complete si fuera necesario. No olvidar que la plancha deberá estar ubicada en una superficie plana y horizontal.

- En el caso de las planchas vibradoras unidireccionales (con marcha de avance) se deberán ajustar todas las uniones roscadas de las superficies de contacto (zonas de juntas) si se notaran perdidas de aceite. En general el torque de apriete para estas atornilladuras estará indicado en el manual de servicio de la maquina. Controle asimismo el nivel del aceite del excitador y complételo si fuera necesario.
- La plancha deberá ser mantenida limpia dentro de lo posible. Lavarla si fuera necesario.

3. Rodillos vibratorios

- Controle diariamente para verificar si todos los dispositivos de seguridad están correctamente montados y firmemente fijados o atornillados. Favor de controlar la efectividad y el correcto funcionamiento del sistema de hombre muerto y de la barra de seguridad especial para marcha en reversa en aquellos rodillos provistos con estos sistemas.
- Reaprovisionar el rodillo vibratorio con el combustible correcto dentro de lo posible antes del primer arranque del día. Favor de no fumar durante esta tarea.
- En general es recomendable llenar los tanques de agua antes de comenzar con el trabajo de compactación de capas asfálticas.
- Controle el estado de limpieza y el nivel del aceite dl filtro de aire diariamente. Completar o recambiar el aceite si fuera necesario. Efectué los trabajos de mantenimiento necesarios en el caso de filtros de aire del tipo seco.
- Nunca haga funcionar el equipo sin su filtro de aire.
- Controle diariamente, y antes de arrancar el motor el nivel de aceite del mismo y complete si fuera necesario. No olvidar que el rodillo deberá estar ubicado ene una superficie plana y horizontal.

- Controle diariamente, y complete si fuera necesario, el nivel del líquido hidráulico en rodillos de accionamiento hidrostáticos o semi-hidrostáticos. Controle al mismo tiempo si existen pérdidas de aceite en las tuberías hidráulicas. Apriete las uniones si fuera necesario.
- Mantenga la máquina en estado limpio. Lave diariamente el rodillo a fondo en caso de aplicaciones sobre suelos semi-cohesivos a cohesivos.

ANEXO C

PLANCHAS VIBRADORAS PRESENTES EN EL MERCADO

La Empresa **EMARESA** de Equipos para la Construcción ofrece por ejemplo:

- **Placas Compactadoras reversibles marca Bomag BPR-50/52**

Características Técnicas

- | | | |
|---|---|-------------------------|
| - | Peso de operación | : 428 Kgs. |
| - | Dimensiones de la base(sin extensión) | : Ancho 520 mm. |
| | (con extensión) | : Ancho 660 mm. |
| | | : Largo 900 mm. |
| - | Accionamiento con motor Lombardini Diesel | : 6 LD 400, 8 HP |
| - | Velocidad de avance | : 0 – 24 m/min. |
| - | Fuerza centrífuga | : 50 Kn (5.000 Kggs.). |
| - | Frecuencia | : 58 Hz. |
| - | Consumo de Combustible | : 2.1 lts/hora (Diesel) |

1.- Modelo BPR 50/52 D, con motor Diesel Lombardini 6 LD 400

Valor.....US\$ 6.100.- +IVA.

Equipo opcional: Carro de arrastre para el transporte de la placa

Valor.....US\$ 145.- +IVA.

El precio se entiende la mercadería puesta en la bodega de la Empresa EMARESA, expresado en US\$ dólares, equivalente moneda nacional considerando el cambio correspondiente al valor observado publicado en El Mercurio en la fecha de despacho.

Condiciones Generales:

- | | |
|------------------|--|
| Plazo de entrega | : Inmediato, salvo venta previa |
| Forma de Pago | : Contado, otras condiciones a convenir. |
| Validez | : 15 días. |

El precio de arriendo diario de esta placa es de \$8.500, por un mínimo de 5 días.*

- **Placas Compactadoras reversibles marca Bomag BPR-30/38**

Características Técnicas

- | | | |
|---|---------------------------------------|--------------------------|
| - | Peso de operación | : 195 Kgs. |
| - | Dimensiones de la base(sin extensión) | : Ancho 380 mm. |
| | (con extensión) | : Ancho 580 mm. |
| | | : Largo 730 mm. |
| - | Accionamiento con motor (Diesel) | : Lombardini de 6, 2 HP. |
| - | Velocidad de avance | : 0 – 22 m/min. |
| - | Fuerza centrífuga | : 31 Kn (3.200 Kggs.). |
| - | Frecuencia | : 68 Hz. |
| - | Consumo de Combustible | : 1.1 lts/hora (Diesel) |

1.- Modelo BPR 30/38, accionada con motor diesel Lombardini de 6, 2 HP.

Valor.....US\$ 4.700.- +IVA.

Equipo opcional: Carro de arrastre para el transporte de la placa

Valor.....US\$ 120.- +IVA.

El precio se entiende la mercadería puesta en la bodega de la Empresa EMARESA, expresado en US\$ dólares, equivalente moneda nacional considerando el cambio correspondiente al valor observado publicado en El Mercurio en la fecha de despacho.

Condiciones Generales:

- | | |
|------------------|--|
| Plazo de entrega | : Inmediato, salvo venta previa |
| Forma de Pago | : Contado, otras condiciones a convenir. |
| Validez | : 15 días. |

El precio de arriendo de esta placa es de \$ 6.500 diarios, por un mínimo de 5 días.*

** Todos los arriendos fuera de Santiago tienen un 10% de recargo.*

Comercial TGC Ltda. ofrece maquinaria de compactación **WEBER**. Los valores que se presentan a continuación son oferta para Empresas de arriendo y constructoras.

- **Vibroplaca Modelo CR3 Motor HATZ 1B20** **c/u US\$ 4.800.-**

Características Técnicas

- | | |
|------------------------------------|-------------------------|
| - Peso de operación | : 184 Kgs. |
| - Ancho de trabajo | : 60 cm. |
| - Accionamiento con motor (Diesel) | : HATZ 1 B 20. |
| - Velocidad de avance | : 0 – 22 m/min. |
| - Fuerza centrífuga | : 32.5 Kn |
| - Frecuencia | : 87 Hz. |
| - Consumo de Combustible | : 0,9 lts/hora (Diesel) |
| - Potencia | : 3.4 KW – 4.6 HP. |

Condiciones Generales:

- | | |
|------------------|---|
| Precios | : Unitarios más IVA. |
| Plazo de entrega | : Inmediato, sujeto a venta previa. |
| Lugar de entrega | : Bodega Comercial TGC, u otra a convenir. |
| Forma de Pago | : 30 días documentado. |
| Descuento | : 5% por pago al contado. |
| Tipo de cambio | : Dólar observado, vigente al momento de la compra. |
| Validez oferta | : 15 días. |

- **Vibroplaca Modelo TC66S Motor HATZ 1D41** **c/u US\$ 6.550.-**

Características Técnicas

- Peso de operación : 435 Kgs.
- Ancho de trabajo : 60/80 cm.
- Accionamiento con motor (Diesel) : HATZ 1 D 41.
- Velocidad de avance : 0 – 24 m/min.
- Fuerza centrífuga : 50.5 Kn
- Frecuencia : 62.5 Hz.
- Consumo de Combustible : 1.9 lts/hora (Diesel)
- Potencia : 6.6 KW – 9.0 HP.

Condiciones Generales:

- Precios : Unitarios más IVA.
- Plazo de entrega : Inmediato, sujeto a venta previa.
- Lugar de entrega : Bodega Comercial TGC, u otra a convenir.
- Forma de Pago : 30 días documentado.
- Descuento : 5% por pago al contado.
- Tipo de cambio : Dólar observado, vigente al momento de la compra.
- Validez oferta : 15 días.

A continuación, se presenta una tabla y su correspondiente gráfico con diferentes marcas y modelos de planchas vibradoras, para de esta forma poder evaluar de mejor forma cuál es la opción de compra más económica de acuerdo al nivel de operación a que se someterá la máquina.

ANALISIS DE LA OPCION COMPRA DE PLANCHAS VIBRADORAS

	WACKER		BOMAG		WEBER	
	DPU 2950H	DPU 6055	BPR 30/38	BPR 50/52	CR3	TC66S
Peso de servicio	192	478	195	428	184	435
Ancho de trabajo	50	71	58	66	60	80
Fuerza centrífuga	29	60	31	50	32,5	50,5
Profundidad de compactación (cm)	30	50	30	50	30	50
Velocidad de avance (m/m)	22	28	22	24	22	24
Rendimiento superficial (m2)	660	1193	766	950	792	1152
Rendimiento de compactación (m3/h)	198	596	230	475	238	576
Consumo de combustible (l/h)	1,2	2,2	1,1	2,1	0,9	1,9
Precio (€)	6736	12634	4700	6100	4800	6550
Precio en pesos	\$ 4.354.420	\$ 8.167.123	\$ 3.038.268	\$ 3.943.284	\$ 3.102.912	\$ 4.234.182
mts3 a compactar	1	1	1	1	1	1
n° de pasadas	3	3	3	3	3	3
Mano de obra (\$/h)	800	800	800	800	800	800

COSTOS POR HORA DE TRABAJO

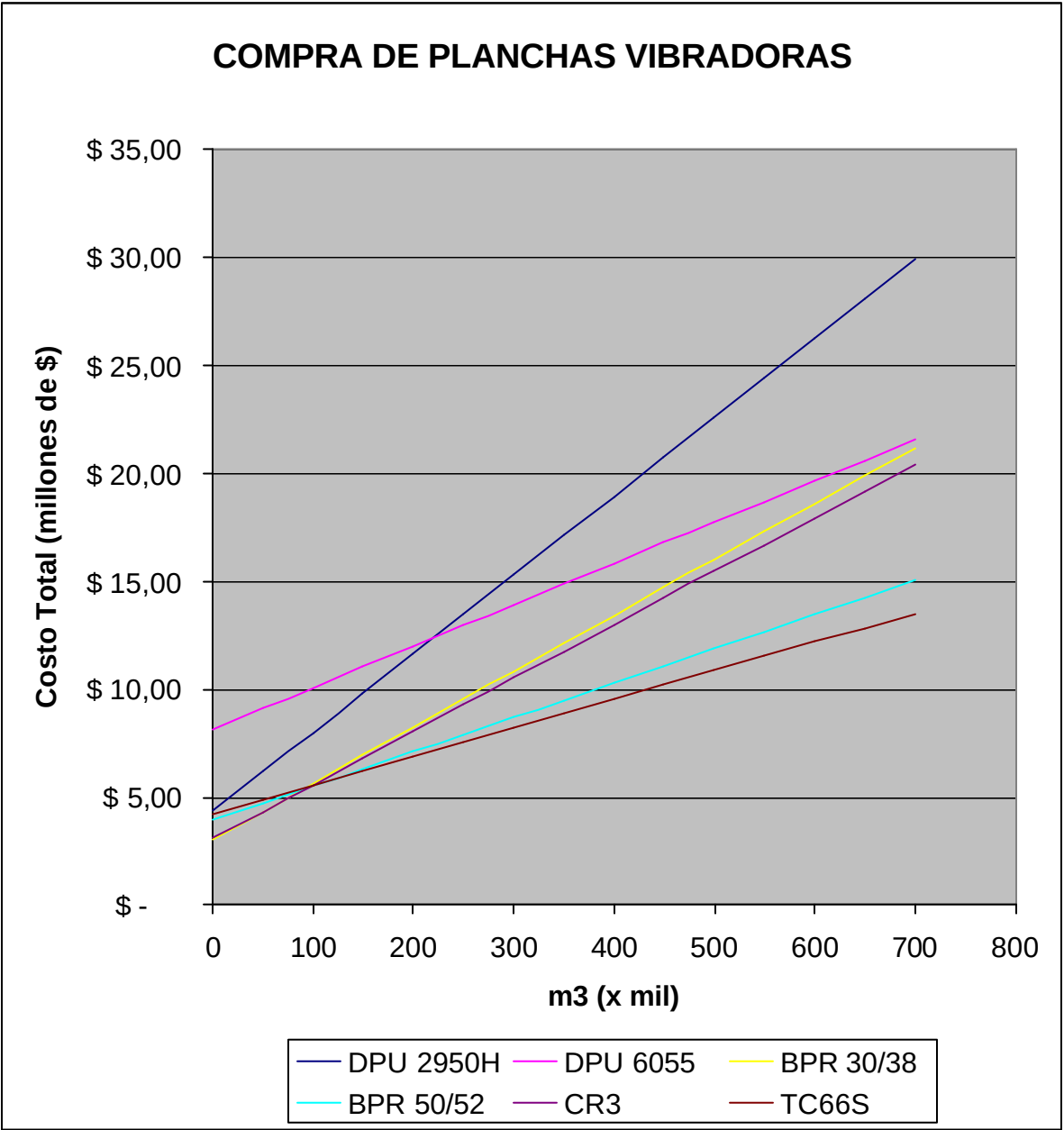
Costos de depreciacion (€)	725,74	1361,19	506,38	657,21	517,15	705,70
Costos de mantenimiento y rep. (\$)	580,59	1088,95	405,10	525,77	413,72	564,56
Costo del combustible (€)	300,00	550,00	275,00	525,00	225,00	475,00
Mano de obra por hora (\$)	800	800	800	800	800	800
Costo de la maquina por hora de trabajo (\$/h)	\$ 2.406,33	\$ 3.800,14	\$ 1.986,48	\$ 2.507,99	\$ 1.955,87	\$ 2.545,25

COSTO TOTAL PARA EL TRABAJO

Tiempo requerido para la compactación (h)	0	0	0	0	0	0
Costo total para el trabajo de comp.	\$ 36,46	\$ 19,12	\$ 25,95	\$ 15,83	\$ 24,70	\$ 13,26

* La cantidad de 100,000 m3 es solamente de referencia, ya que para obtener los gráficos es necesario ir variando esta cantidad

** Valor promedio, ya que el número de pasadas depende del tipo de suelo a compactar



En la gráfica se puede apreciar claramente que para un nivel de operación mayor a 100.000 m3 aprox. la opción más económica es la plancha vibradora WEBER, modelo TC66S distribuida por la empresa Comercial TGC; mientras que para un nivel de operación menor a 100.000 m3 resultan más conveniente los modelos BPR 30/38 y la CR3, máquinas estas marca BOMAG y WEBER respectivamente .

BIBLIOGRAFÍA

- Manual de Compactación Wacker.
- Boletines Técnicos de Maquinaria de Compactación Wacker.
- “Evaluación de Proyectos”, Sapag y Sapag.
- “Finanzas Corporativas”, Stephen A. Ross, Ed. Mc Graw Hill
- “Introducción a la Compactación Vibratoria”, Empresa Vibromax.
- Ivan Cabello G. de Comercial TGC Ltda.
- Héctor Godoy, Div. Maq. Construcción, EMARESA S.A.
- “La Ingeniería de Suelos en la Vías Terrestres”, Vol 1, autor Alfonso Rico y Hermilo Castillo, Ed. Limusa.
- “Compactación de Terrenos: Terraplenes y Pedraplenes”, autor Francisco Arredondo, Editores Técnicos Barcelona 1966.