Maquinaria de movimiento de tierras utilizadas en Ingeniería Rural

GREGORIO L. BLANCO ROLDÁN[1] Y JOSÉ RAMÓN JIMÉNEZ ROMERO[2].

[1]Área de Ingeniería Agroforestal. [2]Área de Ingeniería de la Construcción. Departamento de Ingeniería Rural. Universidad de Córdoba.

La construcción de explanaciones para caminos rurales y la construcción de balsas son las obras de Ingeniería Rural donde el movimiento de tierras es uno de los capítulos más importantes del presupuesto y donde es imprescindible conocer y seleccionar la maquinaria a emplear. En este artículo se analiza cada una de las máquinas empleadas en el movimiento de tierras para la realización de estas labores.

Foto 1. Tractor sobre ruedas.

Foto 2. Tractor sobre cadenas con hoja de empuje universal U y escarificador tipo paralelogramo ajustable de un brazo.

Las obras de movimiento de tierras permiten modificar la forma del terreno natural mediante la adición o retirada de materiales.

Tradicionalmente la maquinaria de movimiento de tierras se clasifica en siete grupos:

- Equipos de excavación y empuje. Tractor.
- Equipos de excavación y carga. Cargadora.
- Equipos de carga y acarreo. Traíllas.
- Equipos de excavación en posición fija. Excavadoras hidráulicas.
- Equipos de acarreo. Camiones y dúmperes.
- Equipos de nivelación. Motoniveladora.
- Equipos de compactación de suelos.

Equipos de excavación y empuje. El tractor

El tractor es una máquina autopropulsada sobre ruedas (**foto 1**) o cadenas (**foto 2**), diseñada para ejercer una fuerza de empuje o de tracción. Los tractores son las máquinas más potentes y robustas usadas en los trabajos de movimiento de tierras.

Los elementos de trabajo más utilizados de los tractores son la hoja empujadora para la excavación y empuje del material y el escarificador (ripper) para romper la textura del terreno, aunque disponen de otros como la barra de tiro y el cabrestante, utilizados menos frecuentemente.

Los tractores son utilizados para el remolque o empuje de máquinas cuando falta potencia o adherencia, como es el caso de las mototraíllas en la fase de carga.

Los tractores sobre cadenas son los más generalizados en este tipo de máquinas. Existe una amplia gama de pesos y potencias. Pueden tener un peso de hasta 100 toneladas y una potencia de hasta 600 kW. Los tractores sobre ruedas pueden tener un peso de hasta 50 toneladas y 350 kW de potencia.

La ventaja de los tractores sobre cadenas frente a los tractores sobre ruedas es que presentan un mayor factor de tracción y transmiten una menor presión al terreno (0,5 kg/cm^2 - 0,8 kg/cm^2 en tractores sobre cadenas frente a 2,5 a 3,5 kg/cm^2 en tractores sobre ruedas), lo que les permite un mayor campo de aplicación en los trabajos de movimiento de tierras.

Sin embargo, los tractores sobre cadenas son más lentos que los tractores sobre ruedas (los primeros alcanzan una velocidad máxima de 15 km/h frente a los 60 km/h de los segundos), aunque presentan mayor maniobrabilidad en espacios reducidos y mayor fuerza de tiro.

Los tractores sobre cadenas trabajan de forma económica en trayectos que no sobrepasen los 100 m en total (excavación y transporte), aunque el óptimo se encuentra en torno a 20 m. Para mayores distancias (150-200 m) pueden utilizarse los tractores sobre ruedas siempre que las condiciones del terreno lo permitan.

En los tractores sobre cadenas, según el posicionamiento de la hoja, existen dos tipos: hoja recta (Bulldozer), cuando la hoja se mantiene con el borde de ataque perpendicular al eje longitudinal de la máquina, y hoja angulable (Angledozer), cuando la hoja puede variarse de modo que el borde de ataque quede inclinado respecto al eje longitudinal del tractor.

En los tractores con hoja rec-

ta, según el trabajo a realizar y el material a mover, se pueden acoplar varios tipos de hojas; las más usadas son la universal (U), con mayor capacidad de transporte y utilizada para material liviano y fácil de empujar; la recta (S), con poca capacidad de transporte y fácil penetración para terrenos duros; y la semiuniversal (SU), que combina las mejores características de las anteriores.

Para el trabajo en materiales muy duros, es necesario emplear explosivos o escarificar antes de la utilización de la hoja empujadora, realizando el tractor un trabajo combinado de escarificación y empuje.

En cuanto al escarificador o ripper, es un equipo colocado en la parte trasera del tractor, provisto de uno o varios brazos de profundidad regulable situados sobre un bastidor. Existen tres clases: tipo bisagra, tipo paralelogramo y tipo paralelogramo ajustable.

Este último es el más utilizado en los tractores sobre cadenas, en éstos el ángulo de ataque puede modificarse a voluntad independientemente de la profundidad, lo que permite ajustarlo al ángulo óptimo de penetración y aumentar la producción.

Una primera guía para estudiar la escarificabilidad de una roca es el origen de las mismas. Las rocas ígneas (granitos, basaltos, etc.) por lo general son poco escarificables, sólo lo serán cuando presenten un intenso grado de fracturación y meteorización. Las rocas metamórficas (Gneis, pizarras, cuarzo y esquistos) varían mucho en escarificabilidad, dependiendo de su esquistosidad. Las rocas sedimentarias (areniscas, calizas, conglomerados, etc.), cuya principal característica es la estratificación, son tanto más ripables cuanto menor es la potencia de los estratos.

El método más conocido para determinar la escarificabilidad-ripabilidad de un terreno es el de la velocidad sísmica de las rocas, que es una característica que las clasifica bastante bien en cuanto a su dureza y que se viene utilizando tradicionalmente para decidir si el terreno es ripable o, por el contrario, hay que recurrir a la voladura.

Los fabricantes de tractores tienden a decir que los macizos rocosos son escarificables hasta un entorno de los 2.000 m/s, y proporcionan unos gráficos donde relacionan la velocidad sísmica de las distintas rocas y los tractores más adecuados.

La producción efectiva horaria de la máquina depende del número de ciclos teóricos realizados en una hora, de la producción por ciclo y del factor de eficiencia horaria.

El ciclo de trabajo de estas máquinas consta de tres operaciones:

- Excavación y arranque: el operador baja la hoja hasta que comience a clavarse en el terreno. El tractor continúa avanzando, disminuyendo su velocidad y aumentando su empuje, en primera marcha y velocidad entre 2,5 y 3 km/h (0,694-0,833 m/s).
- Acarreo: el maquinista levanta la hoja para empujar y transportar el material ya excavado sin proseguir la excavación. Será conveniente mantener la primera velocidad. Después de acarrear, apila para una carga posterior mediante la cargadora.
- Retorno: el tractor se detiene, invierte la marcha y retrocede a mayor velocidad con la hoja levantada para reanudar el ciclo de trabajo.

El **cuadro I** recoge las velocidades típicas de trabajo combinado de escarificación y empuje de un tractor sobre cadenas.

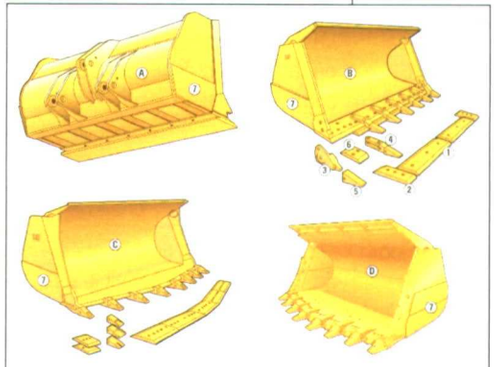
3

Foto 3. Cargadora sobre neumáticos.

Cuadro I. Velocidades en el trabajo combinado de escarificación y empuje.

Trabajo	Velocidad (km/h)
Escarificado (1ª marcha)	
Avance	1,5 - 2,0
Retroceso	2,0 - 6,0
Empuje	
Avance	2,0 - 2,5
Retroceso	2,0 - 6,0

Figura 1.



Cucharones, implementos y puntas de cargadoras.

(A) Cucharón universal con cuchilla de enrase; (B) Cucharón de excavación general; (C) Cucharón para roca; (D) Cucharón para roca de servicio pesado; (1) Cuchilla de ataque; (2) Cantonera; (3-6) Dientes; (7) Plantas antidesgaste.

Equipos de excavación y carga. Cargadora

Es una máquina autopropulsada equipada con cuchara frontal y un sistema de brazos accionado por cilindros hidráulicos cuya función principal es la carga de materiales sueltos de abajo hacia arriba. Permite transportar el material a distancias mínimas y descargarlo sobre camiones o tolvas. La geometría en Z de sus brazos le proporciona una gran fuerza de arranque que le permite arrancar en banco materiales de fácil excavación.

Hay dos tipos de cargadoras:

- Sobre ruedas, que son la mayoría.
- Sobre cadenas, que se utilizan para trabajos especiales.

La mayoría de las cargadoras de ruedas tienen chasis articulado y tracción a las cuatro ruedas (**foto 3**).

Los parámetros característicos geométricos más importantes de las cargadoras son la altura de descarga y el alcance. A mayor altura de descarga, mayor altura de la caja podrán tener los equipos de acarreo, y a mayor alcance, más completamente se podrá realizar el llenado de los camiones.

Además, los fabricantes deberán proporcionar los siguientes parámetros dinámicos: carga de vuelco, carga máxima de operación, capacidad de elevación del sistema hidráulico y fuerza de arranque. Ésta depende del tipo de cuchara, de la geometría de los brazos, de la capacidad del sistema hidráulico y de la fuerza de penetración.

La **figura 1** muestra distintos tipos de cucharas. Cuanto más ancha es, menor fuerza de arranque tiene. El

Foto 4. Retrocargadora. Foto 5. Traílla remolcada por tractor.

Cuadro II. Tiempo de ciclos por fases.

Fases del ciclo de carga	Tiempo (s) mínimo	máximo
Avance y llenado de cuchara	6	12
Recorrido en V y cuatro cambios de marcha	12	21
Vuelco de la cuchara y descarga	6	2
Tiempo total	**20**	**39**

Cuadro III. Tiempos fijos típicos para mototraíllas.

Forma de carga	Tiempo de carga (s) Mínimo	Máximo	Tiempo de descarga (s) Mínimo	Máximo
Autocargable	54	60	36	42
Con tractor empujador	24	36	36	42

tamaño a utilizar depende de la densidad del material; los fabricantes proporcionan una guía para la elección del cucharón (**figura 2**) en función de la densidad del material a cargar.

El ciclo de trabajo de una cargadora consta de cuatro fases:

· Carga. La cargadora empuja avanzando con la cuchara baja hasta hincarla en el material, la llena debido a la presión de su borde cortante contra el terreno y la pone boca arriba elevándola ligeramente para retroceder.

· Acarreo. Con la cuchara llena, la máquina retrocede y eleva, basculando simultáneamente la cuchara, para que el material excavado no se derrame. En esta posición puede transportar a pequeñas distancias.

· Descarga. Se coloca junto al medio de transporte, ajustando la altura de vertido al mismo que bascula la cuchara y el material cae en la caja o es amontonado.

· Maniobra. Retrocede y maniobra mientras baja la cuchara vacía, hasta alcanzar el frente de llenado en la posición a ras del suelo para comenzar el ciclo.

La producción de las cargadoras se estima a partir de la producción por ciclo, del número de ciclos teóricos que la máquina hace en una hora y del factor de eficiencia horaria. La producción por ciclo es la capacidad útil del cucharón, que depende de la capacidad nominal y de un factor de llenado.

El **cuadro II** presenta unos valores orientativos de los tiempos teóricos del ciclo de trabajo de una cargadora.

En este grupo de máquinas se incluyen las cargadoras mixtas, también llamadas "retropalas" o "retrocargadoras" (**foto 4**). Son muy versátiles y rentables, ya que trabajan muchas horas en la obra, y son de tracción total con ruedas neumáticas para tener mayor capacidad de autotransporte.

Equipos de carga y acarreo. Traíllas

Las traíllas son máquinas de movimiento de tierras que realizan la excavación, carga, transporte, descarga y extendido del material. Se clasifican, según el sistema motriz que las dividen, en dos grupos:

· Remolcadas por tractores. Más adecuadas en distancias cortas y pequeñas obras de ingeniería rural (**foto 5**).

· Autopropulsadas o mototraíllas. Con tres subgrupos: convencionales o de tracción delantera (**foto 5**), de tracción total y de tracción delantera pero con elevador de paletas para la carga.

Las mototraíllas constan de tres partes: el elemento tractor, la caja y la suspensión. La caja, abierta por su parte superior, está dotada de movimiento ascendente y descendente y provista de un borde con cuchilla recambiable. Tienen un coste horario alto, pero permiten realizar varias operaciones con una misma máquina. Su rango de utilización óptimo está entre los 150 y 3.000 m; siendo para estas distancias muy rentables.

El ciclo de trabajo de las mototraíllas consta de cuatro fases:

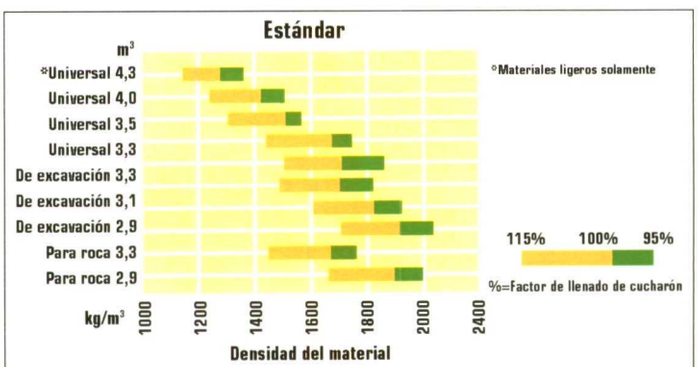
· Carga. En esta fase se baja la caja y se levanta la compuerta de la misma, hasta que la cuchilla se apoye sobre el terreno y penetre en él. Al avanzar la máquina, el terreno va llenando la caja.

· Acarreo. En esta fase se levanta la caja y se baja la compuerta. Se conseguirán elevadas velocidades de hasta 45 km/h, si las pistas se mantienen en buen estado.

· Descarga. En esta fase se baja la caja hasta la altura deseada de extendido, se levanta la compuerta y la placa eyectora fuerza el material a salir en el mismo sentido que avanza la traílla, expulsando el material contenido en ella por la parte delantera.

· Retorno. En esta fase se le-

Figura 2.



Guía para la elección del cucharón en cargadoras.

Fuente: cargadora sobre ruedas marca Caterpillar y modelo 962-H.

vanta la caja y se baja la compuerta.

La producción horaria depende de la producción por ciclo (capacidad útil de la caja) y del número de ciclos efectivos por hora. La duración de un ciclo de trabajo depende de los tiempos de carga, de acarreo, de descarga y de retorno, y está influido por el estado de conservación de las pistas y por la pendiente de acarreo y retorno. Los tiempos de carga y descarga son fijos. El **cuadro III** recoge los valores típicos de estas operaciones, aunque pueden verse afectados por las condiciones de trabajo.

Para determinar la velocidad de acarreo y retorno, el fabricante nos proporciona unos gráficos de tracción-velocidad-pendiente.

Equipos de excavación en posición fija. Excavadoras hidráulicas

Las excavadoras hidráulicas son máquinas de movimiento de tierras, diseñadas para la excavación del material en banco y carga. Su equipo de trabajo se mueve mediante cilindros hidráulicos. Este tipo de máquinas trabajan desde una posición fija y realizan desplazamientos tan sólo cuando la excavación sale fuera de su alcance, no excavando mientras la máquina avanza. Además, se caracterizan por presentar tiempos del ciclo de trabajo muy cortos.

Las excavadoras hidráulicas pueden ser clasificadas de dos formas diferentes:

· Por el sistema de rodadura:
- Sobre ruedas.
- Sobre cadenas.

· Por el equipo de trabajo:
- Excavadoras de empuje frontal: el cazo está colocado con los dientes orientados hacia el exterior de la máquina, produciéndose el arranque cuando el cazo se aleja de la misma. Son de gran tamaño y su aplicación típica es en minería.
- Retroexcavadora (**foto 6**): el cazo se orienta con los dientes hacia la máquina, produciéndose el arranque cuando el cazo se aproxima a la misma. Su aplicación típica es la excavación por debajo del plano de apoyo de la máquina.
- Excavadoras bivalvas: el equipo de trabajo dispone de una cuchara compuesta por dos mandíbulas de acero que se articulan entre sí accionadas por cilindros hidráulicos. Se utilizan para excavaciones profundas (pozos, pilotes, etc.).

Las retroexcavadoras combinadas con equipos de acarreo son las máquinas más utilizadas para la compensación longitudinal de tierras y las más económicas cuando hay que mover tierra a más de 3.000 m de distancia.

El equipo de trabajo consta de la pluma (monobloque o formada por dos piezas), el brazo y el cazo. La fuerza de excavación depende de las fuerzas de empuje del brazo y de giro del cazo. Con brazos y cazos cortos conseguimos fuerzas de excavación mayores. El fabricante nos proporciona las curvas de excavación (**figura 3**) para determinar el alcance de la máquina.

El ciclo de excavación de las retroexcavadoras consta de cuatro fases:

· Carga del cazo. La máquina hinca los dientes del cazo en el terreno y lo mueve en el frente de excavación, cargándolo.

· Giro de la superestructura. Una vez cargado el cazo, éste se eleva, produciéndose a continuación el giro de la plataforma hasta el punto de descarga.

· Descarga del cazo. Cuando el cazo se halle sobre el punto de descarga, se produce ésta, bien basculando el cazo o bien por el fondo.

· Giro de la superestructura. Descargado el cazo, la plataforma gira hacia el frente de excavación para el ciclo siguiente.

Al igual que en el resto de las máquinas, la producción horaria depende de la producción por ciclo, del número de ciclos teóricos y del factor de eficiencia horaria. La producción por ciclo depende de la capacidad nominal del cazo y de un factor de llenado.

El tiempo de un ciclo de excavación depende de la capacidad nominal del cazo y del tipo de material (**cuadro IV**), del ángulo de giro de la superestructura y de la relación entre la profundidad de excavación y la carrera de ataque óptima de la retroexcavadora.

Equipos de acarreo. Camiones y dúmperes

Los equipos de acarreo utilizados para el transporte del material cargado por las cargadoras o excavadoras hidráulicas son los siguientes:

· Camiones basculantes: pueden circular por carretera y presentan las ventajas de que son fáciles de alquilar o subcontratar, tienen poca tara y se consiguen mayores velocidades en carreteras en buen estado. Los principales inconvenientes son que tienen ruedas pequeñas y bastidor de una sola pieza no apto para ser utilizado en terrenos de mala traficabilidad y que no están diseñados para conducción extraviaria.

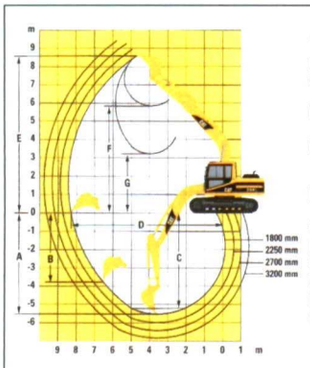
· Bañeras o semirremolques basculantes: tienen una cabeza tractora y semirremolque basculante apoyado mediante un pivote. El vehículo completo tiene cuatro o cinco ejes. La aplicación típica en obras es el acarreo de áridos por carretera. Tienen dificultad para la conducción extraviaria.

Foto 6. Retroexcavadora hidráulica con pluma monobloque y dúmper extraviario rígido.

Cuadro IV. Duración del ciclo de excavación de retroexcavadoras hidráulicas trabajando con ángulo de giro de 90° y altura óptima de corte.

Tipo de material	Capacidad nominal del cazo					
	0,7 m³	0,9 m³	1,2 m³	1,7 m³	2,6 m³	3,6 m³
Arena o grava	12 s	14 s	14 s	16 s	18 s	23 s
Tierra común	15 s	16 s	16 s	18 s	20 s	25 s
Arcilla dura y tenaz	18 s	20 s	20 s	22 s	24 s	29 s
Arcilla húmeda	21 s	24 s	24 s	25 s	27 s	32 s

Figura 3.



	Corto	Intermedio	Largo	Extralargo
	mm	mm	mm	mm
Balancín	**1800**	**2250**	**2700**	**3200**
A Profundidad máxima de excavación	5533	5983	6433	6830
B Profundidad máxima de excavación con frente vertical	3780	4803	5480	5979
C Profundidad máxima de excavación para obtener una superficie horizontal de 2440 mm	5223	5725	6217	6650
D Alcance máximo a nivel del suelo	8273	8713	9167	9600
E Altura máxima de corte	8592	8948	9277	9416
F Altura máxima de carga	5829	6103	6403	6743
G Altura mínima de carga	3200	2749	2291	1899
Del balancín	122 kN	105 kN	88 kN	80 kN
Del cucharón	132 kN	132 kN	112 kN	112 kN
Radio de Giro de la Punta del Cucharón	1410	1410	1410	1410

Curva de excavación. Retroexcavadora con pluma de una pieza. Fuente: retroexcavadora sobre cadenas marca Caterpillar y modelo 318 BL.

Foto 7. Dúmper extraviario articulado. Foto 8. Motoniveladora.

• Camiones dúmper: son camiones reforzados y robustos de mayor tara que los basculantes y más apropiados para circular por pistas interiores de la obra. Tienen tres ejes, los dos traseros de tracción y el delantero de dirección. Respetan el gálibo de carretera.

• Dúmper extraviarios: especialmente diseñados para conducción extraviaria. Tienen cargas por eje y gálibo que no les permiten circular por carretera. Tienen una tara muy elevada por la robustez de su chasis, suspensión, ejes y caja en forma de V. Los dúmper rígidos tienen un eje delantero y otro posterior con ruedas gemelas de gran diámetro y anchura. En los dúmper articulados (**foto 7**) el giro se produce por la articulación; tiene tres ejes y el delantero no es direccional.

El ciclo de trabajo de los equipos de acarreo consta de cinco fases:

• Posicionamiento en zona de carga.
• Carga del medio de acarreo.
• Acarreo del material.
• Posicionamiento en zona de descarga más la propia descarga.
• Retorno al lugar de la carga para iniciar de nuevo el ciclo.

La producción dependerá del número de ciclos teóricos en una hora, de la producción por ciclo y del factor de eficiencia horaria.

Equipos de nivelación. Motoniveladora

Su función principal es el extendido y nivelación de terrenos, aunque son máquinas muy utilizadas por la variedad de trabajos en los que pueden intervenir, como la apertura y refino de cunetas, el perfilado de taludes y el bombeo de explanadas. Estas operaciones se consiguen gracias a una hoja situada en el centro de la máquina y que tiene una serie de movimientos de rotación horizontal y vertical.

Como puede observarse en la **foto 8**, la parte trasera es donde se sitúan el motor y el puesto de conducción. En la parte intermedia es donde está el equipo de trabajo, compuesto por la barra de tiro, la corona dentada y la hoja vertedera. Aunque son de chasis articulado, en la parte delantera llevan dos ruedas directrices que además permiten la inclinación para la mejor adaptación a los trabajos de la motoniveladora.

Los diferentes movimientos de la hoja son: elevación o descenso con respecto al suelo, giro de la hoja en su plano horizontal, variación del ángulo de ataque de la hoja con respecto al terreno, movimiento lateral con respecto de la corona, inclinación de los extremos de la hoja y desplazamiento lateral del círculo fuera de la máquina a ambos lados.

Opcionalmente, se puede situar en la parte trasera un pequeño escarificador para facilitar el trabajo de la hoja en aquellos terrenos que por su dureza no puedan ser cortados o nivelados directamente y una hoja empujadora frontal.

Para este tipo de máquina es más complejo definir un ciclo de trabajo estándar, debido a la cantidad de trabajos que puede realizar; sin embargo, sí podemos establecer algunas consideraciones:

• Por lo general, en cuanto al número de pasadas, en el prenivelado se darán tres y en refino seis, con regreso marcha atrás.

• La velocidad de nivelación varía de 6 a 14 km/h, dependiendo de que sea nivelado o refino. La velocidad de retroceso va de 15 a 30 km/h según el terreno esté plano o con cordones.

• En cuanto al extendido, el operador va a regular la cuchilla al espesor correspondiente, dando un ángulo que facilite el desplazamiento de los materiales, eligiendo un ángulo de ataque correcto e impidiendo que se forme un cordón importante en el borde retrasado de la cuchilla.

Foto 9. Compactador vibratorio liso.

Equipos de compactación de suelos

La compactación es un proceso mecánico por el que se pretende aumentar la densidad seca de un material, con el objeto de incrementar la capacidad portante de un relleno, impermeabilizar mediante la reducción del volumen de huecos y elevar la resistencia a la deformación.

Existen básicamente cuatro formas de compactar los suelos, según sea el efecto predominante o la combinación de los mismos, a los que se corresponden distintos tipos de compactadores, que son por peso estático, impacto, amasado y vibración.

Podemos distinguir entre los compactadores para suelos plásticos y para suelos granulares.

Para suelos granulares se utilizan principalmente los compactadores vibratorios de tambor liso (**foto 9**), que tienen un tambor en cuyo interior hay un eje provisto de una masa excéntrica que al girar produce una fuerza centrífuga que origina la vibración.

El tambor vibrante completo con su eje está suspendido flotante en ambos lados por medio de unos amortiguadores constituidos por varias placas de hierro-goma-hierro vulcanizadas que impiden el paso de las vibraciones al bastidor, tratándose, pues, de una masa aislada. Cuando el tambor vibra, éste se desplaza en un movimiento hacia arriba y hacia abajo, despegándose del suelo y acumulando energía potencial que se transforma en energía cinética de caída. Ésta se convierte en energía de impacto al contacto con el suelo. La sucesión de impactos propaga por el suelo un tren de ondas de presión que ocasiona la rotura del suelo y la reordenación de las partículas, aumentando la compactación del mismo en profundidad.

Para suelos plásticos se utilizan los compactadores pata de cabra. Actualmente son autopropulsados y disponen de una hoja de empuje frontal. En la superficie del cilindro tienen unas protuberancias troncopiramidales que al girar el cilindro se hunden en el terreno, realizando una compactación de abajo hacia arriba. También son utilizados para airear el terreno si la humedad es excesiva para la compactación. Existen compactadores pata de cabra vibratorios.

Las antiguas apisonadoras de rodillos lisos, rodillos de segmentos, están en desuso. Por otro lado, los compactadores de neumáticos se utilizan principalmente para la compactación de la mezcla bituminosa de firmes. ■