compactación

JOSE MANUEL LOPEZ SAIZ,
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos,
A.M.A.S.C.E.

513-16

sinopsis

Se presenta en este artículo una serie de datos prácticos, con objeto de ayudar a la elección de los equipos más adecuados y los sistemas de trabajo más rentables para los diferentes tipos de obra de compactación. Se han dejado a un lado las consideraciones puramente teóricas, con el fin de hacer hincapié en la experiencia y realizaciones prácticas.

1 Ensayos de laboratorio

Para clasificar los suelos con relación a su proceso de compactación son interesantes los siguientes ensayos de laboratorio:

- 1.1. Límite líquido: Cuanto más alto indica que en el terreno hay más proporción de arcilla o, a proporciones iguales, que existen arcillas de distintos tipos (la caolinita, en igualdad de proporción en la mezcla, da límites líquidos más bajos que la montmorillonita o bentonita).
- 1.2. Límite plástico, que indica la cantidad de arcilla existente en el suelo.
- 1.3. Índice de plasticidad.
- 1.4. Humedad natural y humedad de equilibrio.
- 1.5. Análisis granulométricos.
- 1.6. En terrenos arenosos es interesante obtener:
 - 1.6.1. Índice de poros máximo, $e_{\max}$.
 - 1.6.2. Índice de poros mínimo, $e_{\min}$.
 - 1.6.3. Índice de poros del terreno, e .
 - 1.6.4. Grado de compactación, D_d :

$$D_d = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}.$$

- 1.7. En terrenos coherentes es muy interesante el ensayo a rotura por compresión simple, dándonos la resistencia del suelo a este ensayo que llamaremos q_u .
- 1.8. En todo tipo de terrenos es conveniente efectuar ensayos Proctor normal o modificado, sobre todo en terrenos arcillosos. Este ensayo relaciona el grado de humedad del terreno con la densidad seca que se puede obtener con una cierta energía de compactación.

Fig. 1. Arcillas.

Fig. 2. Arena limpia.

Estos ensayos que relacionan densidad seca-humedad-energía de compactación, dan lugar a curvas del tipo de las figuras 1 y 2.

Como se deduce de los mismos:

- A) Existe una humedad óptima por cada energía de compactación con la cual se obtiene una densidad seca máxima.
- B) El aumentar la energía de compactación hace que la humedad óptima tome valores cada vez menores.
- C) Las arcillas son más sensibles a la humedad óptima que las arenas.

De las curvas se deduce que con humedades por encima del óptimo de una cierta energía, el aumentar ésta apenas produce compactación.

Por otro lado, si se quiere obtener densidades superiores a 100 % Proctor normal conviene hacer un Proctor modificado, ver su humedad óptima y relacionarla con el Proctor normal. La razón es sencilla, la energía del Proctor modificado es ya difícil de aplicar en obra, lo cual quiere decir que obtener el 100 % del Proctor modificado es caro y difícil. Si nos exigen el 103 % Proctor y las curvas Proctor normal y modificado están muy próximas, este 103 % Proctor normal puede llegar a suponer el 99, 100 ó 101 % Proctor modificado, lo cual representa una exigencia muy fuerte. Si las curvas por el contrario están muy separadas, será sencillo con una ligera disminución de humedad y el correspondiente aumento de energía obtener ese 103 % Proctor normal exigido.

2

Cuando no es sencillo efectuar ensayos de laboratorio por las prisas o por la poca importancia de la obra, se puede efectuar una clasificación de los suelos mediante inspección ocular; en este caso se debe observar:

1) Tamaño y gradación de los granos

Basta con extender sobre un papel blanco y observar la distribución y uniformidad de los tamaños de granos. Los finos que no puedan distinguirse por simple inspección se vierten en un vaso de agua y se dejan sedimentar; la gradación se puede deducir de los estratos, el limo se mantendrá en suspensión durante un minuto aproximadamente y la arcilla una hora o más.

2) Prueba de dilatancia

Se quitan a mano las partículas mayores de 5 mm, se añade agua a la muestra de manera que se forme una pasta blanda sin llegar a ser pegajosa, se coloca esta muestra en la palma de la mano y se golpea a ésta varias veces, produciendo en la muestra un efecto de sacudida o vibración. La reacción a este ensayo es fluir el agua a la superficie dándole un aspecto blando y lustroso; si se aprieta la mezcla entre los dedos, entonces desaparece el agua de la superficie y ésta pasa de brillante a mate.

La reacción rápida indica falta de plasticidad, tal es el caso de limos inorgánicos, polvo de roca y arena muy fina.

La reacción lenta corresponde a limos arcillosos.

La no reacción es propia de arcillas y tierras orgánicas.

3) Prueba a rotura o resistencia a compresión de un suelo seco

Para ello se aprieta con los dedos; de lo cual se deduce:

- pequeña resistencia: si se puede hacer polvo fácilmente;
- resistencia media: si hay que apretar fuertemente para pulverizarla;
- resistencia alta: si la muestra rompe, pero no se pulveriza.

4) Prueba de plasticidad

Se quitan las partículas de más de 3 mm de diámetro, se hace girar la muestra hasta formar un cilindro de 3 mm de diámetro, se dobla el cilindro, se hace una masa y se repite la operación hasta que el cilindro se rompa al arrollarlo. En este momento la humedad de la probeta es el límite plástico.

Un suelo es plástico si se puede arrollar fácilmente en cilindros sin romperse.

Con terrenos muy plásticos es posible formar bolas por debajo del límite plástico, y se deforma bajo la presión de los dedos sin romperse.

En terrenos de mediana plasticidad se pueden formar bolas por debajo del límite plástico, pero se rompen con los dedos.

Con terrenos de baja plasticidad no se pueden formar bolas por debajo del límite plástico.

Los suelos plásticos que tienen mucha materia orgánica o mucha mica forman cilindros muy blandos y esponjosos.

5) Prueba del olor

Es fácil distinguir el olor de materias orgánicas, el cual se puede hacer más patente calentando una muestra húmeda.

6) Prueba del brillo

Se corta con una cuchilla una muestra seca o ligeramente húmeda del terreno: una superficie brillante indica una arcilla de alta plasticidad; una superficie mate señala un limo o arcilla de baja plasticidad.

3

Clasificación de suelos

En función de estos ensayos o de las observaciones in situ se puede clasificar el suelo mediante las tablas I a V, adjuntas, tanto según la clasificación de Casagrande o la de AASHO, y a partir de esta clasificación se puede asimismo tener una idea del comportamiento del terreno, densidades máximas alcanzables, equipo de compactación más oportuno, etc.

TABLA I

DIVISIONES PRINCIPALES			Símbolos del grupo	Grupo de comportamiento	IDENTIFICACION DE LABORATORIO	
1	2	3	4	5	6	7
SUELOS DE GRANO GRUESO Más del 50 % es retenido por el tamiz n.º 200 de la serie Tyler	ARENAS Y GRAVAS	Limpias	GW	I	Se determina el porcentaje de grava y arena. Según el porcentaje de finos (fracción que pasa por el tamiz n.º 200 de la serie Tyler), los suelos de grano grueso se clasifican de la siguiente manera:	$C_u > 6 ; 1 < C_c < 3$
			GP			Si se cumple alguna de las siguientes condiciones: $C_u < 6 ; 1 > C_c ; C_c > 3$
			SW			$C_u > 4 ; 1 < C_c < 3$
			SP			Si se cumple alguna de las siguientes condiciones: $C_u < 4 ; 1 > C_c ; C_c > 3$
		Con arcilla	GC	II	Menos del 5 % ... GW, GP, SW, SP Más del 12 % ... GC, GM, SC, SM Entre el 5 % y el 12 %. Casos límites. Se utiliza doble símbolo	$C_u = \frac{D_{60}^*}{D_{10}}$
			SC			$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$
		Con limos	GM	III		Límites de Atterberg sobre la línea A
			SM-1			Límites de Atterberg bajo la línea A
			SM-2			$D_{50} > 0,15 \text{ mm}$
						$D_{50} < 0,15 \text{ mm}$
SUELOS DE GRANO FINO Menos del 50 % es retenido por el tamiz n.º 200 de la serie Tyler	LIMOS Y ARCILLAS	LL < 50	ML	IV		
			CL-1			
			CL-2			
			CH			
		LL > 50	MH	VIII		
		Orgánicos	OL	IX	Igual que ML	$\frac{\text{L.L. (muestra secada al horno)}}{\text{L.L. (muestra secada al aire)}} < 0,7$
			OH			
			Pt	X

* D_N = Diámetro de grano correspondiente al N % de la curva granulométrica. El N % tiene diámetro menor.

TABLA II

DIVISIONES PRINCIPALES			Símbolos del grupo	Grupo de comportamiento	DESCRIPCION TIPICA
1	2	3	4	5	6
SUELOS DE GRANO GRUESO Más del 50 % es retenido por el tamiz n.º 200 de la serie Tyler	ARENAS Y GRAVAS	Limpias	GW	I	Gravas de buena gradación, mezclas de grava y arena, con poco o nada de finos
			GP		Gravas de gradación deficiente, mezclas de grava y arena, poco o nada de finos
			SW		Arenas de buena gradación, arenas con grava, poco o nada de finos
			SP		Arenas de gradación deficiente, arenas con grava, poco o nada de finos
		Con arcilla	GC	II	Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla
			SC		Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla
		Con limos	GM	III	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo
			SM-1		Arenas limosas gruesas, mezclas de arena y limo
			SM-2		Arenas limosas finas, mezclas de arena y limo
			ML		IV
SUELOS DE GRANO FINO Menos del 50 % es retenido por el tamiz n.º 200 de la serie Tyler	LIMOS Y ARCILLAS	LL < 50	CL-1	V	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja, arcillas limosas, arcillas con arena o grava
			CL-2	VI	Arcillas inorgánicas de plasticidad media, arcillas con limo, arena o grava
			CH	VII	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas grasas
		LL > 50	MH	VIII	Limos inorgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos
			OL	IX	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas, de baja plasticidad
			OH		Arcillas orgánicas de media a alta plasticidad, limos orgánicos
		Orgánicos	Pt	X	Suelos de alto contenido de materia orgánica. Suelos turbosos

4 Obtención teórica de algunas propiedades

Tanto la densidad máxima obtenible en el Proctor normal como la humedad óptima, pueden aproximarse por los procedimientos siguientes:

4.1. Humedad óptima

Se puede tomar aproximadamente igual a 1/2 del límite líquido o, con más exactitud, obtenerse del gráfico siguiente:

Fig. 3

TABLA III

DIVISIONES PRINCIPALES			Símbolos del grupo	Grupo de comportamiento	IDENTIFICACION IN SITU				
1	2	3	4	5	Prueba de dilatancia	Resistencia del material seco a compresión	Plasticidad	Brillo	Olor orgánico
SUELOS DE GRANO GRUESO Más del 50 % es retenido por el tamiz n.º 200 de la serie Tyler	ARENAS Y GRAVAS	Limpias	GW	I	Identificación por inspección ocular. Limpio, grueso, granos separados				
			GP						
			SW						
			SP						
		Con arcilla	GC	II	Los finos tienen las mismas propiedades de los grupos V, VI y VII				
			SC						
		Con limos	GM	III	Los finos tienen las mismas propiedades del grupo IV				
			SM-1						
			SM-2						
			ML	IV	Rápida	Poca	Ninguna	Mate	Nada a poco
SUELOS DE GRANO FINO Menos del 50 % es retenido por el tamiz n.º 200 de la serie Tyler	LIMOS Y ARCILLAS	LL < 50	CL-1	V	Lenta a media	Poca a media	Baja	Poco brillante	Nada a poco
			CL-2	VI	Nula a lenta	Media a alta	Media	Brillante	Nada a poco
		LL > 50	CH	VII	Nula	Muy alta	Alta	Muy brillante	Nada a poco
			MH	VIII	Nula a lenta	Poca a alta	Baja a media	Poco brillante	Nada a poco
		Orgánicos	OL	IX	Nula	Poca a alta	Media (empapado)	Mate a poco brillante	Pronunciado
			OH						
			Pt	X	Identificación por inspección visual. Alto contenido de fibras orgánicas				

TABLA IV. EQUIPOS DE COMPACTACION APROPIADOS PARA DISTINTOS TIPOS DE TERRENO

EQUIPOS	Pedraplén	ARENAS Y GRAVAS		LIMOS		ARCILLAS	
		Normales	Gradaciones uniformes	Arenas limosas	Limos arenosos		
Rodillo liso	—	A	—	A	A	—	—
Rodillos vibrantes ligeros	A	MA	MA	A	A	A	—
Rodillos vibrantes pesados 10-12 Mp	MA	MA	—	MA	A	A	A
Rodillo de neumáticos 10-15 Mp	—	A	MA-R	A	A	MA	—
Rodillo de neumáticos 50-100 Mp	A	—	—	—	—	—	—
Rodillo pata de cabra	—	—	—	—	A	MA	MA
Pata de cabra vibratorio	—	—	—	A	A	MA	MA
Rodillo de rejas	A	A	A	A	A	A	—
Densidad Proctor modificada que es posible obtener en equipos adecuados		95 a 96 %		98 a 100 %		94 a 102 %	

A = Apto.—MA = Muy apropiado.—R = Remolcado.

TABLA V **clasificación de suelos según Casagrande**

1	2	3	4		5	6	7	8		9	10	11	12	13	14	15
Divisiones principales	Grupos de suelos y nombres típicos	Símbolo del tipo de suelo	IDENTIFICACIÓN GENERAL		Observaciones y pruebas del material in situ	Pruebas principales de clasificación en muestras probatorias	Valor como función de la acción de los límites	Valor como límite para construcción de compactación		Reacción de los límites de los suelos	Relación de la acción de los límites	Drenaje	Compactación obtenida. Equipo recomendado	Densidad relativa al 95% de compactación de suelos	Índice de compactación relativo al 95% de compactación de suelos	Grupos correspondientes a la zona clásica del P.E.A.
			Resistencia al corte en estado seco	Exámenes adicionales del material				Con palisado para el polvo	Con tratamiento superficial							
Gravas y arenas compensables y no compensables	Gravas o mezclas de grava y arena de buena gradación, poco o nada de material fino	GW	Ninguna	Gradación, Forma granular	Peso específico relativo de al menos 2.50	Análisis mecánico	Excelente	Regular a malo	Excelente	Ninguno a muy pequeño	Casi ninguna	Excelente	Excelente, Treidor	2.000 0.35	50	A-3
	Mezclas de grava, arena y arcilla de gradación apropiada	GC	Mediana a elevada	Gradación, Forma granular, Examen del material ligante en estado húmedo y seco	Grado de compactación	Análisis mecánico, límites líquido y plástico del material ligante	Excelente	Excelente	Excelente	Mediano	Muy pequeño	Prácticamente impermeable	Excelente, Treidor	2.000 0.30	40	A-1
	Gravas o mezclas de grava y arena de gradación deficiente, poco o nada de material fino	GP	Ninguna	Gradación, Forma granular	Capacidad de drenaje	Análisis mecánico	Bueno a excelente	Malo	Malo a regular	Ninguno a muy pequeño	Casi ninguna	Excelente	Buena, Treidor	1.400 0.45	25-60	A-3
	Gravas con material fino, arenas con mucho limo o arcilla y mezclas de grava, arena y arcilla con mala gradación	GP	Muy pequeña a elevada	Gradación, Forma granular, Examen del material ligante en estado húmedo y seco	Relación de compactación y características de drenaje	Análisis mecánico, límites líquido y plástico del material ligante	Bueno a excelente	Malo a bueno	Regular a bueno	Pequeño a mediano	Casi ninguna a pequeña	Regular a prácticamente impermeable	Buena, Regular, buen control de flujo de agua	1.400 0.40	20	A-2
	Arenas o mezclas de arena y grava de gradación apropiada, con poco o nada de material fino	SW	Ninguna	Gradación, Forma granular	Condiciones de la capa de drenaje	Análisis mecánico	Excelente a bueno	Malo	Bueno	Ninguno a muy pequeño	Casi ninguna	Excelente, Treidor	Excelente, Treidor	1.400 0.40	20-60	A-3
Arenas y suelos arenosos	Mezclas de arena y arcilla de buena gradación	SC	Mediana a elevada	Gradación, Forma granular, Examen del material ligante en estado húmedo y seco	Pruebas de fricción	Análisis mecánico, límites líquido y plástico del material ligante	Excelente a bueno	Excelente	Excelente	Mediano	Muy pequeña	Prácticamente impermeable	Excelente, Rodillo goma de cabra	2.000 0.35	20-60	A-1
	Arenas de mala gradación con poco o nada de material fino	SP	Ninguna	Gradación, Forma granular	Pruebas de carga	Análisis mecánico	Regular a bueno	Malo	Malo	Ninguno a muy pequeño	Casi ninguna	Excelente	Buena, Treidor	1.400 0.70	10-30	A-3
	Arenas con material fino, arenas con mucho limo o arcilla y mezclas de arena y arcilla de mala gradación	SP	Muy pequeña a elevada	Gradación, Forma granular, Examen del material ligante en estado húmedo y seco	C.H.R.	Análisis mecánico, límites líquido y plástico del material ligante	Regular a bueno	Malo a bueno	Malo a bueno	Pequeño a grande	Casi ninguna a mediana	Regular a prácticamente impermeable	Buena, Regular, buen control de flujo de agua	1.400 0.60	10-30	A-2
Suelos finos	Limos homogéneos, arenas muy finas, arenas con mucho limo o arcilla, arenas con mucho limo o arcilla de mala gradación	ML	Muy pequeña a mediana	Examen del material húmedo, Pruebas de plasticidad	Peso específico relativo al peso seco, Contenido de agua y relación de viscosidad	Análisis mecánico, límites líquido y plástico	Regular a malo	Malo	Malo	Mediano a grande	Pequeña a mediana	Regular a malo	Buena a regular, buen control de flujo de agua	1.400 0.70	6-25	A-4 A-7
	Arcillas inorgánicas de baja a mediana plasticidad, arcillas arenosas y arcillas limosas	CL	Mediana a elevada	Examen de la plasticidad	Consistencia del material sin perturbar y resistencia	Análisis mecánico, límites líquido y plástico	Regular a malo	Malo	Malo	Mediano a grande	Mediana	Prácticamente impermeable	Regular a buena, Rodillo goma de cabra	1.400 0.70	4-15	A-4 A-6 A-7
	Limos o arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad	OL	Pequeña a mediana	Examen de la plasticidad, Olor	Entrenamiento, humedades de retención, etc. Drenaje y situación de las aguas subterráneas	Análisis mecánico, límites líquido y plástico	Malo	Muy malo	Malo	Mediano a grande	Mediana a grande	Malo	Regular a mala, Rodillo goma de cabra	1.400 0.90	3-8	A-4 A-7
Suelos finos altamente compresibles	Arenas finas y limosas que contienen mucho o material diatomeo, limos orgánicos	MH	Muy pequeña a mediana	Examen del material húmedo, Pruebas de plasticidad	Pruebas de fricción	Análisis mecánico, límites líquido y plástico	Malo	Muy malo	Muy malo	Mediano a muy grande	Grande	Regular a malo	Mala a muy mala	1.400 0.70	7	A-5
	Arcillas inorgánicas muy plásticas	CH	Elevada	Examen de la plasticidad	Entrenamiento, humedades de retención, etc. Drenaje y situación de las aguas subterráneas	Análisis mecánico, límites líquido y plástico	Muy malo	Muy malo	Muy malo	Mediano	Grande	Prácticamente impermeable	Regular a mala, Rodillo goma de cabra	1.400 0.80	6	A-5 A-7
	Arcillas orgánicas de alta o mediana plasticidad	OH	Elevada	Examen de la plasticidad, Olor	Entrenamiento, humedades de retención, etc. Drenaje y situación de las aguas subterráneas	Análisis mecánico, límites líquido y plástico	Muy malo	Inscribible	Mediano	Grande	Prácticamente impermeable	Regular a malo	Mala a muy mala	1.400 0.70	4	A-7 A-8
Suelos orgánicos fibrosos de alta compresibilidad	Suelos orgánicos pantanosos y terrenos turfosos	P	De fácil identificación	Consistencia, Textura y contenido de humedad in situ			Regular a malo	Regular a malo	Regular a malo	Mediano a muy grande	Grande	Regular a malo	Compensación no práctica			A-8

Las densidades se refieren a suelos que tienen un peso específico comprendido entre 2.65 y 2.75. Especialmente recomendables para fines de vías de comunicación.

4.2. Densidad Proctor normal

Se puede obtener de la fórmula;

$$d_{\text{Proc.}} = \frac{\delta}{1 + W\delta},$$

siendo:

W = humedad óptima en tanto por uno;

δ = densidad real de las partículas que componen el terreno.

A partir, pues, de los valores de la humedad óptima es factible obtener la densidad máxima Proctor normal que podemos esperar en el suelo.

La compactación de los distintos tipos de suelos

1. Pedraplenes

Compuestos de rocas en tamaños grandes que dependen del espesor de las capas y de la forma de compactación. Como norma se debe exigir que el tamaño máximo no supere los 3/4 del espesor de la capa; se pueden admitir también piedras de tamaño mayor en pequeñas cantidades y que no superen el espesor de la capa.

Para la ejecución del pedraplén existen dos soluciones normalmente empleadas, dependiendo sobre todo de la calidad de la piedra y su granulometría.

Para piedras muy buenas, que se meteorizan con dificultad y tienen poca cantidad de finos, el método normal es el simple vertido en tongadas grandes, muy grandes, regando a presión abundantemente; la cantidad de agua de riego es muy grande, del orden de dos veces el volumen del pedraplén, y se ha llegado en algunos casos a necesitar cinco veces el volumen del mismo. Con este método el pedraplén se compacta por su propio peso, y los finos van a ocupar los huecos entre las piedras gracias al riego a presión. Los asientos de los pedraplenes hechos de esta forma suelen ser pequeños, aunque siempre mayores que los pedraplenes compactados.

El otro método consiste en extender el pedraplén en tongadas pequeñas, pero de tamaño suficiente para que puedan compactarse debidamente.

Los equipos a emplear en este caso son los supercompactadores de neumáticos, de 50 a 100 Mp, remolcados por tractor de orugas, o bien los vibradores remolcados, de 6 Mp en adelante.

El espesor de las capas dependerá del equipo de compactación, que ha de lograr una densificación apropiada en toda ella; y función del espesor será el tamaño máximo de la piedra.

Sobre este tipo de compactación se ha sistematizado muy poco; la única forma de elegir adecuadamente un equipo es hacer un ensayo in situ, a escala natural.

Existen dos métodos para estos ensayos que se han empleado con normalidad y al parecer con éxito:

Uno de ellos consiste en medir las densidades in situ después de un cierto número de pasadas mediante un ensayo semejante al de la arena, es decir, haciendo un agujero en el terreno, pesar lo que se ha sacado y obtener por un método cualquiera el volumen de dicho agujero.

El otro método reside en ir midiendo el asiento del pedraplén en una serie de puntos fijados de antemano mediante una retícula de cuerda a partir de encamillados en el exterior de la zona de ensayos.

Con cualquiera de estos métodos se va estudiando el efecto del número de pasadas del rodillo.

El estudio del espesor de la tongada se puede efectuar ensayando sucesivamente en diversos espesores, pero es más sencillo hacer un pedraplén de espesor variable y realizar el ensayo de una sola vez.

Como en estos pedraplenes es imposible efectuar ensayos Proctor, hay que tomar algún criterio para indicar la compactación oportuna; ésta suele ser la de que la densidad o el asiento del terraplén en dos pasadas consecutivas no varía apreciablemente.

El equipo que parece más apropiado para este método en el rodillo vibrante pesado de 8 a 10 ó 15 Mp.

Este método se emplea cuando se desean asientos muy pequeños o cuando el terreno es meteorizable, buscándose entonces que, por estar los huecos rellenos, no se disgreguen las rocas o, de hacerlo, no haya efectos perjudiciales por pasar el producto disgregado a ocupar huecos del pedraplén arrastrado por el agua o por movimientos del terreno.

Como datos para una elección de compactación pueden darse ciertos ejemplos del uso de vibradores pesados en compactación de pedraplenes:

1.1. Compactación de zahorras algo cohesivas

La granulometría de las zahorras era:

La compactación se hizo en capas de 70 cm a 1 m en cuatro pasadas con rodillo vibrante de 8 a 10 Mp.

Como control se empleó la densidad Proctor de la fracción que pasaba por tamiz de 1/2 pulgada.

Tamiz (pulg.)	Porcentaje retenido
4	85-100
2	72-100
1 ½	65-99
1	52-98
¾	41,96
½	32-88
N.º 4	21-55
N.º 8	14-22
N.º 16	9-34
N.º 100	3-23
N.º 200	1-20

1.2. Compactación de un pedraplén en capas de 90 cm

La granulometría era:

La compactación se ensayó con rodillos vibratorios pesados circulando a velocidad de 3 km/hr: el número de pasadas necesario fue de doce para el de 5,5 Mp y de diez para el de 8 Mp.

Tamaño (cm)	Porcentaje retenido
60	90-100
15	45-60
3,75	25-35
1,25	15-23
0,23	10-20

1.3. Compactación de esquistos arcillosos, tamaño máximo 50 cm

Se ensayaron capas de 40 a 80 cm, consiguiéndose la misma compactación. Se empleó rodillo SAW 180 de 11 Mp, bastando cuatro pasadas. Rodillos más ligeros, de 5 Mp, no consiguieron compactar este terreno ni en capas de 40 centímetros.

1.4. Roca de 80 cm en tamaño máximo

Se consiguió compactar en capas de 1,80 m con seis pasadas de rodillo SAW 180 (11 Mp).

1.5. Compactación de cuarcitas en la presa de Carteros

Se hicieron varios ensayos tomando como control el asiento de las capas después de dos, cuatro, seis, ocho, diez pasadas con rodillos de 5 y 10 Mp. La compactación se consideró satisfactoria con seis pasadas de rodillo de 10 Mp en capas de 95 cm; en estos espesores, el rodillo de 5 Mp no pudo compactar.

Posteriormente se ensayó con un rodillo de 15 Mp, con lo cual en tres pasadas se consiguieron efectos equivalentes a las seis pasadas del de 10 Mp.

La compactación definitiva se hizo con el rodillo de 15 Mp en cuatro pasadas y capas de 95 centímetros.

La elección del número de pasadas se efectuó a partir de la rotura de las rocas en superficie. Cuando estas roturas empezaban a ser grandes no se daban más pasadas; para el de 15 Mp, el número de pasadas máximo así determinado fue de cuatro.

El material de pedraplén era cuarcita con un 8-10 % de tamaños mayores de 60-70 cm, siempre que estas rocas mayores no representen dificultades para extender y compactar en capas de 95 cm. La cantidad de finos pasando el tamiz número 4 se redujo a un 5 ó 10 %, dependiendo de la zona de trabajo.

Existe, además de todo lo dicho anteriormente, un método mixto de formación de pedraplenes, que consiste en ir extendiendo en tongadas delgadas de 1 a 2 m y dejar que sea compactado por los equipos de transporte y extendido, regando al mismo tiempo, con lo cual se consigue una compactación intermedia entre la de vertido y la de apisonado.

En los pedraplenes para carretera, los cuales se encuentran siempre coronados por terraplenes, es preciso ejecutar siempre una capa anticontaminante como frontera entre pedraplén y terraplén, pero esta capa debe ser tal que rellene los huecos del pedraplén en su coronación y no permita el paso de las tierras del terraplén a los huecos existentes entre las piedras, ya que esto provocaría asientos en un plazo más o menos largo.

2. Terraplenes

Se consideran terraplenes aquella obra ejecutada con terrenos que contengan poca proporción de rocas de tamaños mayores a 10 cm, cuando esta proporción es grande; y, en general, a partir de que la proporción de tamaño mayor a 2 cm sea el 40 % comienza a haber dificultades en los ensayos Proctor, pues la densidad seca de la fracción menor de 5 mm, que es la empleada en el Proctor, empieza a disminuir debido al acodamiento entre los tamaños gruesos, haciendo inútil este ensayo; en estos casos hay que recurrir a ensayos de placa de carga. Los terrenos con muchos gruesos se deben compactar como pedraplenes.

2.1. Terrenos no cohesivos o poco cohesivos. Arenas o arenas con muy poca arcilla

Estos terrenos pueden compactarse con rodillos lisos, de neumáticos o mediante rodillos vibratorios.

En general, los rodillos lisos no suelen ser muy útiles, puesto que hay que compactar en capas de muy poco espesor; su única ventaja es que deja muy bien compactada la capa superficial. En estos terrenos deberán usarse rodillos neumáticos o vibratorios.

El compactador neumático tiene su campo de empleo óptimo en las arenas bien graduadas, siendo los más interesantes los autopropulsados semipesados (10 a 20 Mp) con presión de inflado variable, efectuando las primeras pasadas con baja presión y las res-

tantes con alta presión de inflado, y tienen la ventaja de un apisonado uniforme en toda la profundidad de la capa. El espesor de las tongadas puede variar entre 20 y 40 centímetros, dependiendo del peso del compactador y del número de pasadas (de ocho a doce). Los rendimientos suelen ser bastante altos cuando hay tajo suficiente, dependiendo de la velocidad y del número de pasadas, como es lógico; dicho rendimiento puede variar entre 250 y 500 m³/hr. La velocidad óptima está alrededor de los 5 km/hr, ya que, a pesar de tener que dar mayor número de pasadas que con velocidades pequeñas, el rendimiento horario aumenta considerablemente.

Velocidades superiores a los 15 km/hr no interesan, pues el rendimiento km/m³ compactado disminuye debido al efecto de muelle que ejerce la presión intersticial. Estos rodillos de neumáticos, sobre todo los más pesados y los remolcados, de 50 a 100 Mp, tienen el peligro de sobrecompactar el terreno, peligro que es mayor cuantos más finos contiene el material, haciéndose muy grave en limos y arcillas. El peligro de sobrecompactación aumenta rápidamente con la velocidad del equipo compactador y se hace patente cuando se usan traíllas de alta velocidad y capacidad grande (de 8 a 10 m³); estas máquinas sobrecompactan el terreno llegando a que la humedad del mismo sature todos los huecos, y entonces cada nueva pasada produce presiones intersticiales que se disipan más fácilmente en dirección horizontal estratificando el terreno en finísimas lajas y produciendo finalmente una rotura total en espesores de 40 ó más cm. La solución en estos casos es una escarificación constante de la superficie para favorecer la evaporación natural. Este peligro aumenta cuanto mayor es la humedad y más finos contiene el terreno.

Los rodillos vibrantes son los más efectivos en estos terrenos, mejor cuanto más uniforme sea su gradación. El tipo a emplear puede ser el tándem autopropulsado o el remolcado: el primero es óptimo en caso de bases-granulares o arenas no cohesivas, y el remolcado amplía su campo a las arenas cohesivas.

En general, se han de emplear frecuencias altas (> 30 Hz) y energías de impacto (fuerza centrífuga) bajas, sobre todo cuando el terreno carece por completo de cohesión. El problema que plantea la vibración en terrenos arenosos es el de que descompacta la capa superior. Este problema es mayor cuando la frecuencia es baja y, por tanto, próxima a la de resonancia del terreno; por ello la frecuencia alta (> 30 Hz) compacta bien incluso en superficie. Los rodillos tándem vibratorios, por otro lado, unen a la vibración el efecto de planchado superficial del cilindro liso sin vibración.

Los rodillos remolcados tienen frecuencia de vibración baja, debido a esto deben utilizarse rodillos más ligeros cuanto menos cohesivo sea el terreno y, por tanto, menos resistencia a la disgregación posea dicho terreno en superficie. En general, el problema de descompactación superficial se corrige fácilmente mediante una o dos pasadas de rodillo sin vibración efectuadas al final de la compactación.

La velocidad óptima de estos rodillos es de 20 m/min (1,2 km/hr); sin embargo, en estos terrenos su velocidad puede aumentar sin otra contrapartida que la de tener que aumentar también el número de pasadas, pero cuanto más cohesivo sea el terreno más nos tendremos que aproximar a la velocidad óptima. El número de pasadas necesario suele ser pequeño (de cuatro a seis, más las pasadas de planchado). Teniendo en cuenta esto y que la profundidad de compactación puede variar entre 20 y 50 cm, los rendimientos de estas máquinas pueden oscilar entre 50 y 300 m³/hr, de donde se deduce la importancia de elección apropiada del espesor de capa y anchura del rodillo. Los rendimientos normales suelen variar entre 80 y 160 m³/hr si no se efectúan estudios especiales. La ventaja de estos equipos es que no hay en ellos peligro de sobrecompactación, aun con humedades muy grandes, ya que producen muy poco movimiento en el terreno.

El rodillo vibrante presenta algunas desventajas en aquellas arenas con cierta cohesión, en las cuales las primeras pasadas compactan fuertemente la superficie creando una

verdadera «losa de tierra» que transmite los esfuerzos de compactación a las zonas inferiores muy disminuidas. En estos casos hay que compactar en tongadas pequeñas con rodillos no muy pesados (4 a 5 Mp).

El problema en estos terrenos es compactar arenas de granulometría muy apretada (tamaño único); esto sólo puede intentarse mediante compactadoras de llanta lisa, pero se hunden con mucha facilidad. Lo que hay que hacer en estos casos es regar abundantemente y compactar con rodillo de neumáticos remolcado con presión de inflado baja.

Fig. 4. Arena de granulometría apretada.

La parte superior de la capa nunca queda bien y se compacta con la capa siguiente.

Limos y arcillas

Son terrenos más difíciles de compactar que los anteriores y son muy sensibles a la cantidad de humedad; lo más normal es compactarlos con humedades ligeramente inferiores al óptimo, pues de esta forma se pueden lograr las densidades deseadas con una energía superior a la del Proctor normal, y se disminuyen los riesgos de sobrecompactación.

Los terrenos limosos en zonas húmedas dan bastantes quebraderos de cabeza, ya que forman, en cuanto se saturan, un colchón elástico que hace bailar el terraplén; las causas son idénticas a las que producen la sobrecompactación, pero en este caso se producen antes de llegar a las densidades requeridas y son más espectaculares. El mecanismo de saturación del terreno es el mismo que para las arcillas.

El terreno se compone de partículas sólidas, agua y aire. A medida que vamos compactando, el aire es expulsado del terreno, ocupando su lugar partículas sólidas; sin embargo, a medida que adelanta la compactación, el terreno se hace más impermeable al aire, y al llegar a una cierta densidad permanece casi constante el contenido de aire, que indica hemos llegado a la máxima densidad del ensayo Proctor o su equivalente para la energía que estamos utilizando; si continúa la compactación, cualquier cambio de volumen se logra a base de disolución del aire en el agua contenida en el terreno (o por expulsión de ésta, caso que no ocurre en terrenos limosos o arcillosos por su gran impermeabilidad y la poca duración de las cargas del compactador), pudiéndose llegar a la saturación del terreno con la correspondiente disminución de resistencia por pérdida de los tensores capilares que aumentan las presiones efectivas en el terreno, favoreciendo la resistencia al corte.

Este problema se puede presentar también en taludes de gran altura compactados con la técnica del máximo Proctor y humedad óptima, pues en ellos la presión que ejercen las tierras de encima pueden obligar a la disolución total del aire y, por tanto, estas capas inferiores compactarán como saturadas.

Cuando hay que compactar limos con gran cantidad de agua, aparecerán los problemas de «colchón elástico»; las soluciones que hay en estos casos son varias.

Si la humedad a que se está compactando se halla próxima a la humedad de equilibrio de los terrenos en esa zona, se compactará en capas delgadas con equipos ligeros que no sobrecarguen mucho el terreno, procurando que al compactar una capa el esfuerzo ejecutado en la capa inferior sea pequeño y dejando de compactar en cuanto aparezca el colchón; los últimos 80 cm habrán de ejecutarse con un buen material.

De todas maneras esta solución es buena para carreteras incluso de mucho tráfico, pero no para áreas de carga o almacenamiento que hayan de soportar grandes cargas muy extendidas.

Para estos casos es mejor solución el compactado por capas «sandwich», es decir, capas de limos arcillosos alternando una capa de 20 cm de terrenos arenosos; con ello se favorece la compactación de las capas que están sobre el terreno arenoso por tener un firme que hace yunque en la compactación. También se favorece el drenaje y, por tanto, el asiento del terraplén se efectúa rápidamente.

En zonas calurosas o de mucho viento se han logrado muy buenos resultados compactando con rodillos ligeros de pata de cabra, pues remueven las tierras y favorecen la compactación.

Otra solución es la estabilización del terreno con cal, pero en general la estabilización sólo puede efectuarse en capas delgadas.

Los terrenos arcillosos o limosos con humedades próximas al óptimo pueden, en general, compactarse bien; los equipos más empleados son: rodillo de pata de cabra, rodillo neumático y rodillo vibrante remolcado.

Los rodillos de pata de cabra son muy apropiados por la alta presión por cm^2 que desarrollan y por el efecto de amasado que ejercen en el terreno. Normalmente, basta una pasada, por cada punto (esto se logra con 6 a 12 pasadas, dependiendo del área de la «pata»). El esfuerzo necesario para su remolque es grande (alrededor de $2/3$ de su peso) y la elección de la presión transmitida al terreno se debe realizar en función de la compactación deseada. Una forma de hacerlo es escogerla igual a la fuerza portante del terreno una vez compactado, y para ello se hace un ensayo de compresión simple del terreno con la humedad de compactación, compactado a la densidad que se desea obtener; llamando a este valor q_u , la presión de contacto ha de ser:

$$p = 3,7 q_u .$$

Con un solo recubrimiento total del área de compactación queda una zona bastante espesa en la parte superior de la tongada sin compactar. Por ello a veces es necesario aumentar el número de pasadas para dar un segundo recubrimiento, con lo cual se obtiene una mayor altura de compactación; sin embargo, no suele ser necesario, y lo que se hace es llevar la compactación total una o dos capas por debajo de la que se está compactando, lo cual debe tenerse muy en cuenta al efectuar ensayos de densidad in situ como control de compactación obtenida.

El espesor de la tongada a compactar no ha de superar los $4/3$ de la altura de la pata.

Los rendimientos que se suelen obtener con estos equipos oscilan entre los 100 y 300 m^3/hr . La velocidad suele ser de 3 km/hr . Una de las ventajas de este equipo es la soladadura perfecta de las capas.

Debido al efecto de amasado que estos equipos producen se pueden emplear para efectuar una estabilización de los terrenos arcillosos al tiempo que se compacta; basta para ello extender cal sobre el terreno antes de comenzar las pasadas con el rodillo de pata de cabra.

Ultimamente se han construido rodillos de pata de cabra vibrantes relativamente ligeros (5,5 Mp máximo), pero que añaden a las cualidades normales de este aparato, las ventajas de la vibración con respecto a la tixotropía del material; son, pues, aparatos que pueden dar excelentes resultados.

La compactación con rodillos de neumáticos también parece que da buenos resultados; sin embargo, no se tiene mucha experiencia al respecto; las capas que se pueden compactar son mayores que las del rodillo de pata de cabra, alrededor de 30 a 35 cm,

tienen mayores rendimientos y necesitan menor esfuerzo de tracción. Se emplean compactadores autopropulsados o remolcados, pero hay que hacer antes ensayos con cuidado de cómo va la compactación. Para compactar arcillas hay que trabajar con presiones de contacto altas, que pueden calcularse igual que en el caso de pata de cabra.

La compactación por vibración resulta efectiva en terrenos arcillosos a base de compactar con rodillo de gran peso (de 5 Mp en adelante), con gran amplitud de vibración y baja frecuencia; con rodillos más ligeros se pueden compactar capas de 15 cm de espesor, pero entonces los rendimientos son bajos (de 50 a 60 m³/hr). Con rodillos pesados puede aumentarse el espesor de la tongada, llegándose hasta 50 cm para rodillos de 11 Mp.

La vibración va bien con terrenos arcillosos, debido a que el movimiento rápido que induce a la masa del terreno produce por tixotropía una disminución de la resistencia al corte del terreno que favorece la compactación. Los efectos de la vibración, por otro lado, desaparecen con rapidez; normalmente un día después de la compactación, el terreno ha recuperado su resistencia inicial.

En estos terrenos es muy importante la velocidad del equipo de compactación, que debe ser pequeña; en rodillos vibrantes no se debe pasar de los 25 m/min, estando el óptimo en 20 m/min; en los neumáticos no se debe pasar de 5 km/hr. En estos terrenos el aumentar la velocidad no tiene sólo como contrapartida el tener que aumentar el número de pasadas, sino que puede no lograrse la compactación necesaria a velocidades mayores del óptimo. A esto mismo se debe el que haya que trabajar con frecuencias de vibración bajas, ya que este material es lento en su reacción a los esfuerzos de compactación debido a su poca permeabilidad y fuerte cohesión.

En estos terrenos la humedad de compactación tiene otro efecto que es interesante considerar:

La estructura de las arcillas que se componen de partículas laminares pueden ser en forma de maraña entrecruzada, trocando los extremos de una partícula el centro de la otra, o bien, de manera ordenada, estando las partículas orientadas en forma de estratos. Ambas estructuras tienen aproximadamente la misma resistencia a la rotura, pero se diferencian en la deformación que alcanzan en este momento; es decir: la estructura desordenada tiene menores deformaciones que la estructura ordenada.

La arcilla puede tomar estas estructuras, dependiendo del tratamiento para su compactación y de la humedad en este momento.

Para un mismo tipo de maquinaria la estructura obtenida depende de la humedad de compactación aunque se llegue a la misma densidad.

Con humedades por debajo del óptimo, las partículas no tienen libertad para orientarse y quedan desordenadas; con suelos más húmedos toman fácilmente ordenación paralela.

El equipo empleado también tiene importancia; aquellos que producen un amasado del terreno originan también una orientación mayor que los otros. En general, se precisa una estructura desordenada en aquellos rellenos que interesa que tengan poca deformación hasta llegar a la rotura (apoyos de cimientas, etc.). También interesa una ordenación paralela cuando se busca una adaptabilidad del terreno, para lo cual tiene que deformarse más fácilmente (núcleos de presas de escollera...).

Por ello, imponiendo una deformación máxima al terreno del 5 %, las cargas que producen estas deformaciones en función del equipo de compactación empleado y de la humedad del terreno en el momento de compactar, pueden observarse en la figura 6, tomando como valor 1 de referencia la carga que produce esa deformación compactado el terreno con rodillo de pata de cabra.

Fig. 5

Fig. 6

3. Compactación de mezclas bituminosas

Los equipos a emplear en mezclas bituminosas dependen fundamentalmente del tipo de éstos.

Para riegos superficiales el mejor equipo de compactación es el rodillo de neumáticos, ya que colocan mucho mejor las piedras debido a su mayor uniformidad de apisonado, dada su deformabilidad; además, su presión de contacto puede ser controlada y evitar la rotura de áridos poco duros.

La compactación debe comenzar inmediatamente detrás del distribuidor de gravilla y continuarlo hasta que el árido se haya colocado debidamente dentro del riego de asfalto. Tan pronto como el asfalto ha endurecido, la compactación debe detenerse para evitar que se suelten los áridos de la capa de asfalto.

La compactación debe comenzarse en el lado exterior de la calzada y progresar hacia el centro; cada pasada debe solapar la anterior en la mitad del ancho.

Compactación de hormigones asfálticos

En general se pueden dividir en capas de base, y en capas de rodadura. Las capas de rodadura tienen un tratamiento especial al que nos referiremos más tarde.

La compactación de capas asfálticas ejecutadas con betunes blandos (80/100 en adelante) se compactan tradicionalmente con resultados bastante satisfactorios, mediante un equipo que consta:

- detrás de la pavimentadora, un rodillo tándem estático de 8 a 10 Mp;
- un rodillo de neumáticos de 10 a 15 Mp;
- una apisonadora triciclo de 12 a 14 Mp;

La compactación se comienza de los bordes hacia el centro.

El aproximado de los bordes se efectúa con mucho cuidado después de un cierto tiempo para evitar que desparrame el hormigón asfáltico en esa zona.

El apisonado de la junta de arranque, si hay espacio suficiente, se debe ejecutar transversalmente a la carretera.

El rodillo de neumáticos tiene una dificultad: es la tendencia del asfalto caliente a pegarse a las ruedas de goma; por ello no puede comenzarse a compactar con él hasta después de cierto tiempo, es decir, hasta que la mezcla no haya alcanzado una temperatura determinada. Esta temperatura de apisonado puede ser más alta cuando se

humedecen los neumáticos por riego constante, existiendo productos que, mezclados al agua, permiten llegar hasta inmediatamente detrás de la extendedora.

Todos los cambios de dirección deben realizarse en la parte más retrasada del tajo de compactación para que, al hacerlo sobre la mezcla más fría, los peligros de arrollamiento, desplazamientos, etc., sean menores; con este método las capas a compactar van de 3 a 5 cm, normalmente.

Con estos tipos de asfalto blando ha dado también muy buen resultado la compactación por vibración mediante rodillos tándem de 4 a 7 Mp, dando inicialmente una o dos pasadas sin vibrar y luego cuatro con vibración a 130° y velocidad de 2 a 3 km/hr y terminando con el de neumáticos como sellado; pero las capas se hacen deslizantes, por lo que se usa poco en capas de superficie. La ventaja de este método es poder ejecutar capas de mayor espesor (de 10 a 12 cm).

En general, en todos los casos la compactación se comienza del borde hacia el centro; en los peraltes se comienza por las partes más bajas y en las curvas por la parte interior.

Con este método, el espesor de las capas a compactar debe ser siempre superior a los 4/3 del tamaño mayor del árido para evitar que el rodillo de llanta lisa se apoye en estas piedras y las rompa.

Igual problema presenta el rodillo liso inmediatamente detrás de la extendedora en hormigones asfálticos con mucha grava gruesa, pues la mezcla caliente no soporta el peso de la apisonadora que gravita ahora sobre el esqueleto de grava y rompe las piedras.

Con betunes duros (hasta 80/100 aproximadamente), el hormigón asfáltico tiene mucha mayor rigidez y, por ello, es mucho más difícil de compactar y, además, la capa se endurece más rápidamente y el cilindro liso de acabado rompe las piedras dejando un firme más deslizante; por ello se tiende en la actualidad a cambiar el sistema de compactación en estas mezclas.

El sistema, que ha sido experimentado ya con éxito en Francia y en EE. UU., consiste en efectuar la compactación con el rodillo de neumáticos inmediatamente detrás de la extendedora, es decir, el rodillo de neumáticos ha de estar siempre entre la extendedora y 60 m detrás de ésta.

Con este método se compacta muy bien este tipo de mezclas en capas de hasta 12 cm, y en mezclas más blandas se ha llegado a compactar capas de 42 centímetros.

El primer problema que plantea este sistema es el del «pegado» de la mezcla a los neumáticos del compactador; sin embargo, se ha observado que cuando las ruedas alcanzan una cierta temperatura el «pegado» cesa y la mezcla se desprende de las ruedas y cae al pavimento.

Continuando en esta dirección se ha llegado a la conclusión de que hay una temperatura crítica de los neumáticos, dependiendo de la presión de inflado, tipo de las ruedas, tipo de betún y temperatura de la mezcla por encima de la cual no existe y por debajo de la misma sí ocurre adherencia entre rueda y mezcla.

La primera solución que se nos viene a la mente para solventar este problema es la de dejar que los neumáticos aumenten su temperatura por simple contacto con el hormigón asfáltico caliente. Por este método normalmente se alcanza el equilibrio después de unos 50 m de extendido; esta zona no queda bien del todo desde el punto de vista estético, pero puede valer, sobre todo en tajos largos en los cuales 50 m representan muy poco; sin embargo, con este sistema hay que organizar muy bien el trabajo de extendido para que no se detenga en ningún momento, pues si lo hace las ruedas neumáticas se enfrían y hay que empezar de nuevo el proceso de calentamiento con otros 50 m de firme.

En todos los casos, pero sobre todo en el de calentamiento de los neumáticos de forma natural, es muy interesante dar una primera pasada con el rodillo tándem liso, con el cual los efectos del «pegado» son menos aparentes, pero, en cambio, en tiempo frío tiene el inconveniente de que puede evitar que los neumáticos se calienten lo suficiente para alcanzar la temperatura crítica.

Otra solución es utilizar cualquiera de los productos (que actualmente, 1969, se fabrican en EE. UU.) que evitan el «pegado» durante el tiempo necesario para que se calienten las ruedas. Estos productos no son en modo alguno «agua», que debe proscribirse por completo en este sistema de compactación porque enfría los neumáticos y evita que se alcance la temperatura crítica.

Por último, la solución más centrada es la de calentar las ruedas previamente al comienzo de la compactación mediante radiadores infrarrojos de butano, con lo cual se consigue que los neumáticos tengan una temperatura superior a la crítica desde el primer instante, evitando los 50 m primeros de calentamiento natural.

Otra cosa a tener muy en cuenta en este tipo de compactación es la presión de los neumáticos, la cual ha de ser suficientemente alta para que produzca una buena compactación, pero no tan alta que origine huellas muy marcadas en la primera pasada, huellas que no desaparecerán por completo al final de la compactación. Por ello son muy interesantes los rodillos de presión controlada desde la cabina de conducción («air-on-the-road»), ya que así se puede hacer un ensayo inicial y escoger la presión que se considere más oportuna.

La presión de inflado controla el hundimiento y la compactación superficial; y el peso del equipo, la profundidad de compactación. Por este motivo, para espesores grandes conviene una primera compactación con rodillo ligero y presión de inflado baja y detrás un rodillo pesado con presión de inflado alta.

Bases y sub-bases

La compactación de suelo-cemento y grava-cemento con materiales poco cohesivos se consigue con facilidad mediante rodillos vibratorios; primero se realizan una o dos pasadas con rodillo tándem liso y luego cuatro o cinco con rodillo vibratorio, aunque siempre, en estos casos, hay que efectuar ensayos previos, pues un exceso de pasadas, además de no ser económico, puede producir una descompactación perjudicial.

Macadam en húmedo

La compactación se hace también mediante equipo vibratorio, preferentemente tándem autopropulsado; tras la colocación de las piedras se dan unas pasadas sin vibrar para encajarlas, luego se extienden los finos de gravilla o arena a razón de un 20 % del total (la piedra gruesa será el 80 %), la cual representa de 400 a 600 kp/m³. Estos finos lo mejor es extenderlos en tres veces: primero, el 50 %; luego, el 25 %, y, finalmente, el otro 25 %. Durante el recebado se pasa continuamente el rodillo vibrante para que los finos ocupen todos los huecos; la terminación se puede lograr mediante un rodillo pesado (tándem o triciclo) de 13 a 15 Mp.

La base de macadam asfáltico hasta de 28 cm se ha compactado debidamente mediante rodillos vibratorios tándem; se pasó primero un rodillo tándem ligero (4 Mp), una pasada inicial sin vibrar y cinco vibrando, y después se pasó un rodillo tándem vibrante más pesado (7,5 Mp), dando con él cuatro pasadas.

La grava-betún con 5 % de betún se ha compactado en capas de hasta 18 cm mediante el equipo siguiente:

- 1.º rodillo vibrante de 4 a 7 Mp;
- 2.º rodillo triciclo de 12 Mp.

Los rodillos a emplear deben ser autopropulsados, ya que los remolcados tienden a formar grietas y arrollamientos en el asfalto caliente; si se usan remolcados hay que hacerlo con diámetros grandes (1,5 m).

Los tándem deben dar su primera pasada con la rueda motriz hacia adelante; si la carga es muy grande se forman grietas normales a la dirección de marcha del rodillo que, aunque no son muy profundas, perjudican el funcionamiento del pavimento al aumentar su permeabilidad (no conviene pasar nunca de 50 kp/cm², pero haciendo siempre un estudio previo del rodillo a emplear). Normalmente los rodillos vibrantes son muy ligeros y, gracias a ello, se evitan estas grietas transversales.

4. Compactación de pequeñas obras de fábrica

Suelen ser puntos poco importantes, pero que si no se ejecutan cuidadosamente pueden producir grandes dificultades posteriormente.

Normalmente, las áreas de trabajo son pequeñas y, por ello, ha de ser también pequeña la maquinaria que se utilice. Lo más normal es el empleo de pisones neumáticos o de explosión o bandejas vibrantes.

a) Compactación detrás de las obras de fábrica

Hay que ejecutarlas con especial cuidado para evitar una zona sin compactar que más adelante asentará, mientras que la obra de fábrica, que seguirá con su altura inicial, marcará con claridad el asiento.

Para esas zonas es preciso elegir con cuidado el terreno que se va a emplear, que debe ser muy poco susceptible al agua.

La compactación se ha de realizar en tongadas pequeñas, 15 cm como máximo, y empleando equipos ligeros que no pongan en peligro la estabilidad de la obra de fábrica al producir empujes muy grandes.

b) Rellenos de zanjas para tubos

En este tipo de rellenos son muy importantes las indicaciones geométricas de las zanjas así como la forma de colocación del tubo; por ello, parece interesante seguir ciertas normas que facilitarán la perfecta colocación y compactación de la zanja.

1. Colocación sobre terreno bueno:

$$A = B + 60, \text{ si } B < 60 \text{ cm}$$

$$A = 2B, \text{ si } B > 60 \text{ cm}$$

2. Colocación sobre terreno inestable:

$$E = 20 \text{ cm por m de relleno sobre el tubo.}$$

$$\text{mín.} = 20 \text{ cm}$$

$$\text{máx.} = 60 \text{ cm}$$

Fig. 7

Fig. 8

3. Colocación sobre roca:

c) *Cuando se colocan tubos bajo relleno de gran altura se procede de la siguiente forma:*

En tubos de gran diámetro se debe ir compactando uniformemente a los dos lados del tubo en capas de 15 cm; hay que compactar como mínimo al 90 % Proctor normal.

Los equipos de compactación medios no pasarán por encima del tubo mientras no tenga sobre él 60 cm de relleno; el equipo pesado no pasará mientras no haya 1,50 m sobre el tubo.

Fig. 9

Fig. 10

Bibliografía

1. «El terreno». Manuales y Normas del I.E.T.c.c.
2. «Compactación de terrenos, terraplenes y pedraplenes». Varios autores. Ed.: Editores Técnicos Asociados.
3. «Etude des conditions de compactage de sols avec rouleaux a pied de motuon et les rouleaux a pneus». Ann. de l'I.T.B.T.P., núm. 195-196, marzo-abril 1964.
4. «Les compacteurs a pneus». Ann. de l'I.T.B.T.P., núm. 193, enero 1964.
5. «Civil Engineering», abril 1966.
6. «Asphalt pavement placed and compacted in thick lifts». Carl. E. Minor Civil Engineering, mayo 1966, págs. 60 a 65.
7. «Asphalt paving manual». The Asphalt Institute. (M. S-8).
8. «Le compactage des enrobes bitumineux». R. Sauterey. Bull. de Liaison des Laboratoires Routiers de Ponts et Chaussées.
9. «Boletín de Información del Laboratorio de Transportes», núm. 48, agosto 1966. La compactación de mezclas asfálticas.
10. «Conferencias del I Cursillo Atencop. de Compactación.
11. «Rockfill design-Carters Dam», Journal of the Construction Division of the A.S.C.E., paper número 4906, septiembre 1966.
12. Manual «Apisonando alrededor del mundo». Bros Incorporated.

Compactage

J. M. López Sáiz, ingénieurs des Ponts et Chaussées

Cet article présente une série de données pratiques, dans le but de faciliter le choix des équipements les plus adéquats et les systèmes de travail les plus rentables pour les différents types d'opérations de compactage. Il ne mentionne pas les considérations purement théoriques, pour mettre l'accent sur l'expérience et les réalisations pratiques.

Compaction

J. M. López Sáiz, civil engineer

This article contains a number of practical data, whose purpose is to aid in the choice of the most suitable equipment and most paying methods of work for the various types of compaction jobs. In the present paper the strictly theoretical considerations have been omitted, in order to emphasize the experimental and practical aspects.

Betonverdichtung

J. M. López Sáiz, Ingenieur

Dieser Beitrag setzt sich mit einer Reihe praktischer Angaben auseinander, mit dem Zweck bei der Auswahl der geeignetsten Ausrüstungen sowie der wirtschaftlichsten zu sein. Rein theoretische Betrachtungen ausser acht lassend, werden hier ausschliesslich praktische Erfahrungen und Ergebnisse behandelt.