

P A R T E S E G U N D A
CONSTRUCCIÓN DE LA EXPLANACIÓN

CAPÍTULO XI

⊙ Construcción de la explanación.

La construcción de la explanación — ejecución de los desmontes y terraplenes — exige el empleo de medios adecuados, con la debida organización y coordinación, para realizar rápida y económicamente el conjunto de los trabajos.

El estudio detallado de la constitución y características mecánicas de los distintos medios especiales de excavación, no entra dentro de

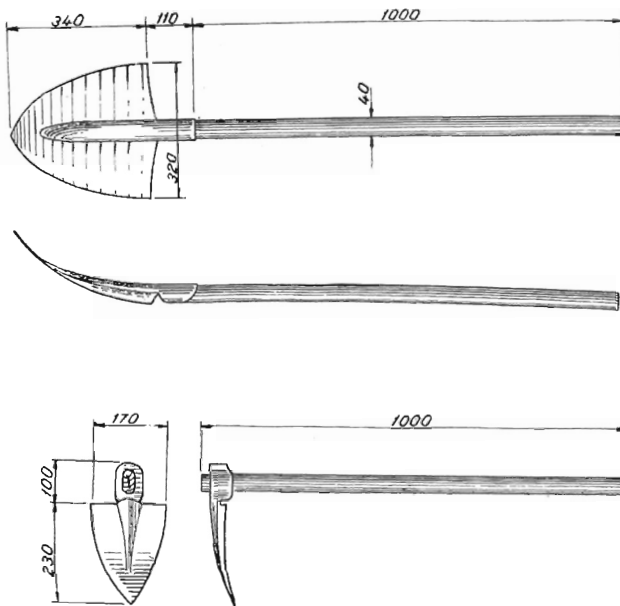


Figura 138.

los límites de nuestro estudio; solamente nos detendremos a considerar aquéllas directamente relacionadas con la construcción de caminos, que sirvan al ingeniero para elegir el material y organizar acertadamente los trabajos de explanación.

La excavación en tierra puede hacerse a mano o, mecánicamente, con excavadoras; la excavación en terreno de tránsito o roca, puede, igualmente, hacerse a mano o con medios mecánicos, para el quebrantamiento o perforación del material a excavar.

157. Excavación a mano.— Cuando el terreno es flojo, arena o arcilla blanda, la excavación se hace con pala de punta o azada (fig. 138). En terrenos más compactos, se emplea el pico (fig. 139).

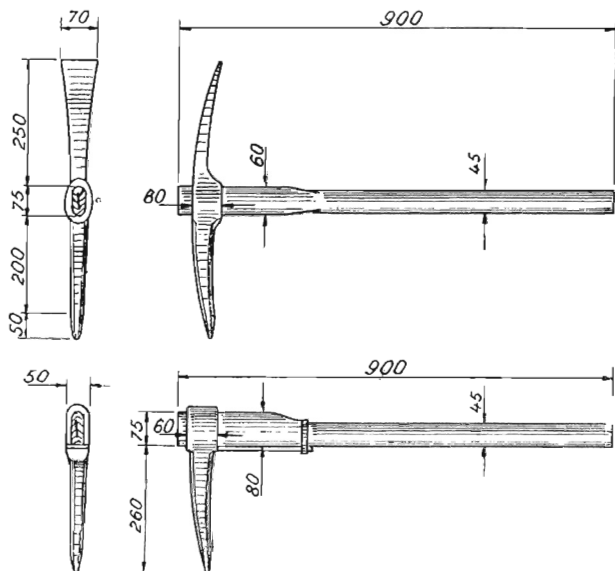


Figura 139.

Cuando se trata de roca blanda — terreno de tránsito — o estratificada, se utiliza la maza y la barra para separar la roca; las barras (figura 140) tienen perfiles distintos y una longitud relativamente grande, para poder utilizar un brazo de palanca que permita aplicar un importante esfuerzo efectivo en la punta de la barra, que se introduce entre las fisuras de la roca.

158. Excavación con palas neumáticas.— En terrenos de mediana consistencia, la excavación puede hacerse con palas neumáticas o quebrantapavimentos (fig. 141). El rendimiento que con esta herramienta se obtiene es bastante superior al logrado a mano, cuando la tierra a

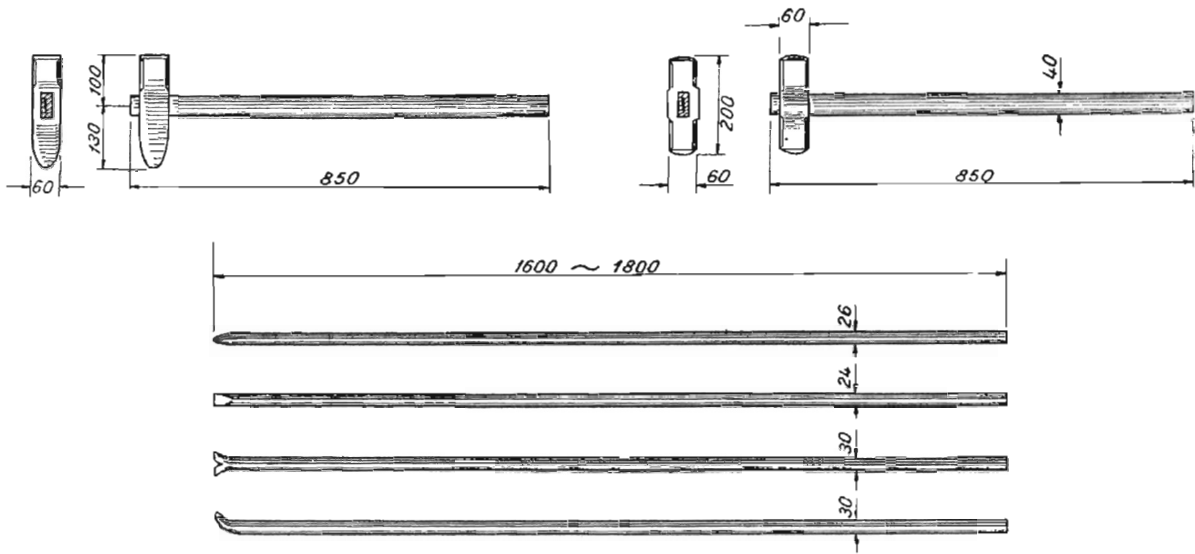


Figura 140.

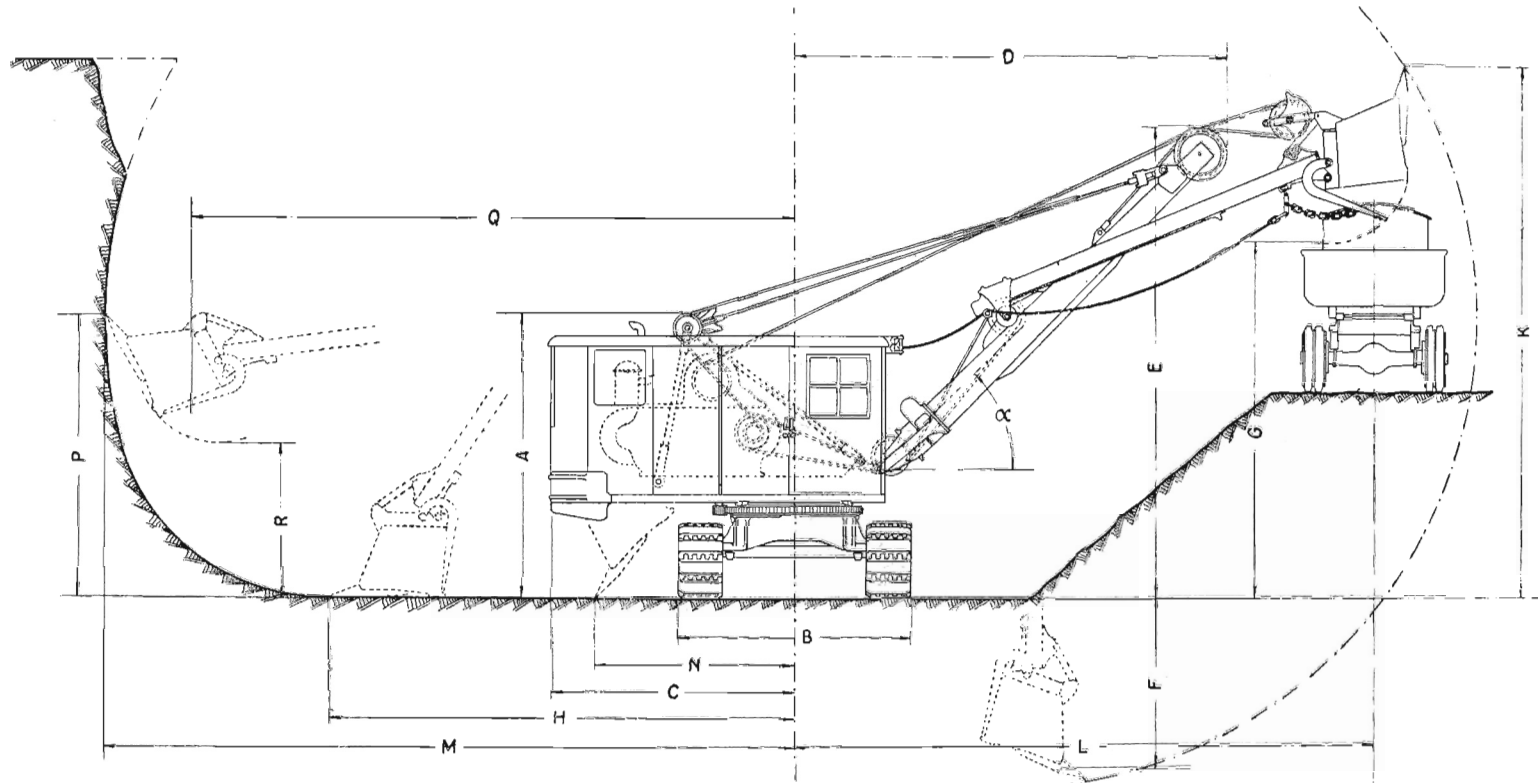
excavar es bastante dura y el volumen de la excavación no permite el económico empleo de máquinas excavadoras.

159. Excavadoras mecánicas.— Pueden ser de dos clases: de cangilones o palas excavadoras; en las obras de caminos se suelen emplear corrientemente las últimas (fig. 142); las palas excavadoras tienen capacidades de la cuchara, variables entre $2/3$ y $2\ 1/2$ m.³; normalmente, de $2/3$ a 1 m.³. Aunque las excavadoras pueden estar movidas



Figura 141.

por electricidad, generalmente, para las obras de caminos, teniendo en cuenta que cambian constantemente de sitio, van equipadas con motores de vapor, o Diesel. Deben ir montadas sobre orugas, que las permitan moverse en terrenos sueltos y mojados. Los movimientos que la pala realiza se indican esquemáticamente en la figura 142; las características de trabajo vienen dadas por las casas constructoras y son, normalmente, las que se señalan; el valor de las dimensiones acotadas con letras, depende del tipo de pala; principalmente interesa: *a*) la longitud del brazo de la pala y su ángulo máximo, α ; de ellos dependen las máximas alturas de excavación, P , y de carga, G , así como la mínima cota, F , de excavación por debajo de la línea del terreno; *b*) la máxima distancia, L , a que puede efectuarse la descarga del material excavado. Conviene exigir se fijen en las propuestas de las casas vendedoras:



Ángulo α	de	35°	a	65°
Dimensión A	"	3'50	"	4'00 m.
" B	"	2'50	"	3'00 "
" C	"	3'20	"	"
" D	"	4'00	"	6'00 "
" E	"	5'00	"	8'00 "

Dimensión F	de	1'75	a	3'00 m
" G	"	3'50	"	7'50 "
" H	"	3'50	"	6'50 "
" K	"	5'50	"	9'50 "
" L	"	3'50	"	9'00 "

Dimensión M	de	7'50	a	10'00 m.
N	"	2'00	"	3'00 "
P	"	3'00	"	4'00 "
Q	"	6'50	"	9'00 "
R	"	1'75	"	3'00 "

Capacidad de la cuchara de 1/2 m³ a 1'00 m³

Figura 142.

1.º Proporción del volumen de la pala que es posible cargar en cada operación.

2.º Velocidad de carga y descarga.

3.º Potencia consumida.

4.º Personal necesario para el movimiento y maniobra de la pala; aparte del personal auxiliar, normalmente se precisa sólo un maquinista, que, desde la cabina, debe dominar la totalidad de la zona de trabajo.

5.º Eficacia de los amortiguadores para que, en la operación de carga, el choque de la pala con el terreno no se transmita al conjunto de la máquina.

La carga del material se hace por medio de unas púas, que son el elemento de la máquina que está sujeto a desgaste más fuerte; deben ser de acero especial y es imprescindible, para tener asegurada la continuidad del trabajo, disponer de repuesto. La potencia consumida varía, según la capacidad de la excavadora: con máquinas corrientes, de $3/4$ m.³, es de 80 a 100 HP.; el rendimiento de la excavadora varía mucho, según la clase de terreno: como término medio, puede considerarse para el tipo medio de $3/4$ m.³, de 30 a 40 m.³ por hora. (Datos complementarios para el cálculo del coste, en el epígrafe 135.)

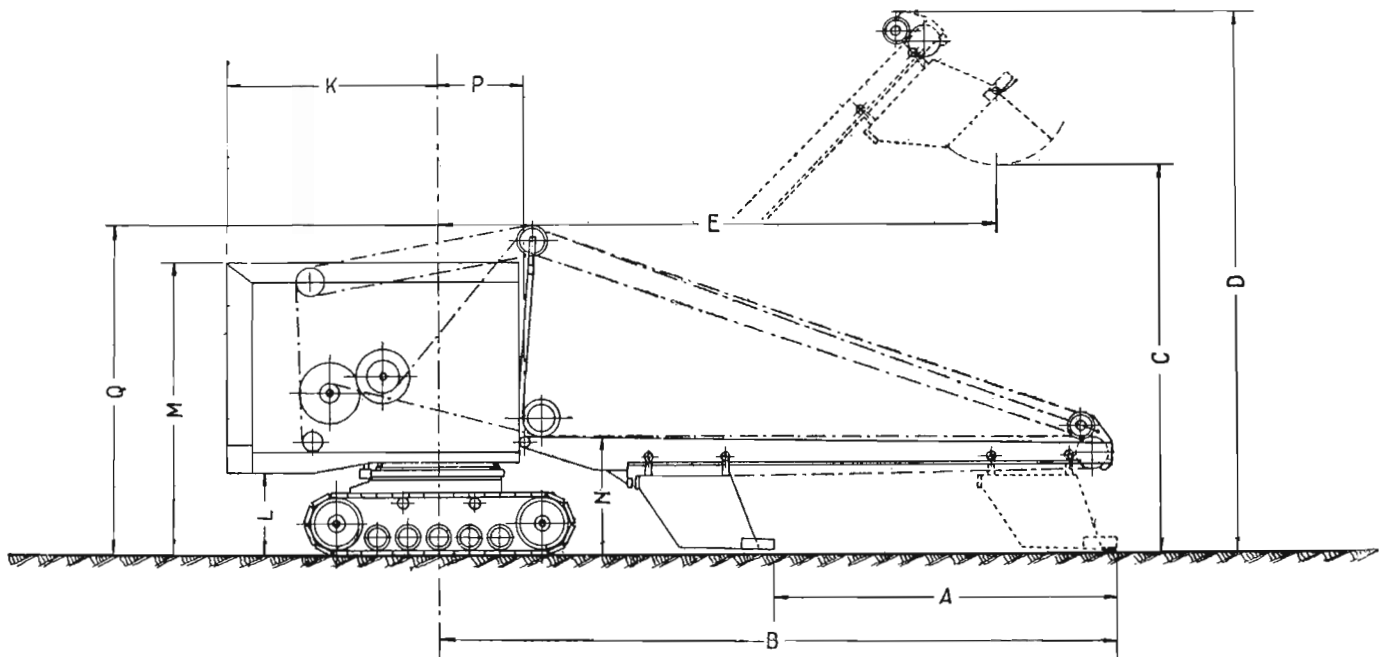
La pala se puede emplear para la carga de la roca procedente de la excavación, en las vagonetas o vagones de transporte; en este caso, su rendimiento es muy variable, pues depende del tamaño a que se haya roto la piedra y su relación con las dimensiones de la cuchara.

El tipo de excavadora, que se puede ver en la figura 143, sirve especialmente para trabajar con pequeña cota — modificaciones de rasante de caminos y preparación de cimientos de firmes — y para cargar los productos del escarificado.

160. Excavación en roca con explosivos. — La excavación en roca, utilizando explosivos, la empleó, por primera vez, en el año 1632, MARTINO WEIGEL. En la roca se ejecutan agujeros, barrenos, en los cuales se introduce el explosivo con su mecha; se cierra el agujero, retacándolo con todo cuidado, y se prende la mecha; la fuerza de la explosión produce la rotura de la roca, en una zona alrededor del barreno; una parte queda completamente suelta y otra quebrantada; ésta se termina de extraer con la maza y la barra.

Labor más costosa es la perforación del agujero, que puede hacerse a mano o mecánicamente.

La perforación a mano se hace utilizando barras de 1,50 a 2 m., de acero fundido o de hierro con la punta de acero, que pesan de 9 a 12 kilogramos; la sección es normalmente octogonal, de punta afilada,



<i>Dimensión</i>	A	6'00	3'75	<i>Dimensión</i>	L	1'00	1'00
"	B	3'75	7'75	"	M	3'00	3'25
"	C	5'25	5'50	"	N	1'00	1'50
"	D	5'25	6'75	"	P	0'75	1'00
"	E	3'75	5'00	"	Q	3'25	3'75
"	K	1'75	2'75	<i>Capacidad de la cuchara</i> 1/3 m ³ 1/2 m ³			
				<i>Longitud del brazo</i> 4'50 6'00.			

Figura 143.

con formas diferentes, según la naturaleza de la roca (fig. 144); para roca muy dura, se emplea la forma *c*, mientras que, para roca de mediana dureza, se emplea la *b*; el ángulo α varía de 60 a 90°; el rendimiento es óptimo para cada clase de roca, con un ángulo determinado, que es conveniente fijar, experimentalmente, antes de empezar los trabajos.

Para ejecutar un barreno, se empieza por preparar en la roca una superficie plana, normal a la dirección en que éste se ha de practicar; hecho esto, se inicia el agujero con golpes de barra, teniendo cuidado de hacer girar ésta a cada golpe; cuanto más pequeño sea el ángulo que se

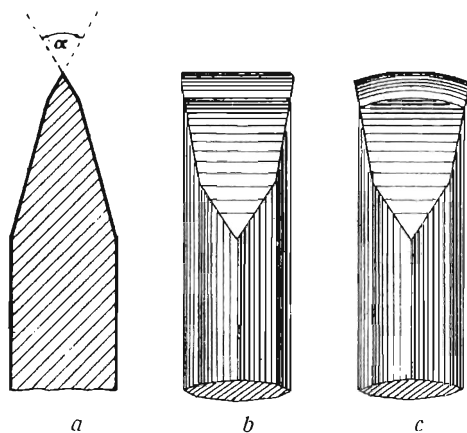


Figura 144.

haga girar la barra, más perfecto será el agujero practicado. Cuando la roca, en la cual se ejecuta el barreno, es una roca seca, la operación se ayuda echando agua en el agujero, con lo cual se hace más fácil la maniobra y se evita el excesivo calentamiento de la barra. Es muy importante que el agujero sea circular y bien derecho; el acero de las barrenas debe ser duro y presentar una gran resistencia al choque; se emplean, para las puntas de las barras, aceros especiales, al cromo, al manganeso y al wolfram.

161. Perforación mecánica.— Cuando la obra a realizar es importante, la perforación a mano resulta lenta y, económicamente, es recomendable recurrir a la perforación mecánica; la rapidez de la perforación mecánica es, por lo menos, tres veces la de perforación a mano; el coste del agujero es menor y éste resulta más regular; se pueden alcanzar 5 ó 6 m. de profundidad, con un diámetro hasta de 90 mm.

dos obreros. El peso de los martillos corrientemente empleados varía de 12 a 20 Kg.

Las barrenas pueden ser de sección llena, hexagonal, octogonal o cilíndrica; pero es más corriente el uso de barrenas perforadas por un

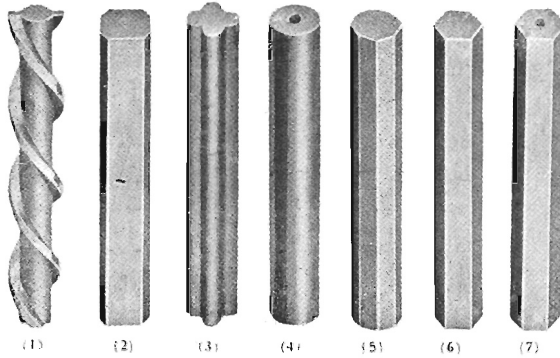


Figura 145.

orificio en su eje que permite inyectar, durante el trabajo, aire a presión o, mejor, agua, que libra la punta de detritus y hace que el trabajo se pueda llevar a cabo con mayor rendimiento (fig. 145). Las puntas de los barrenos pueden ser de las formas que se indican en la figura 146; la disposición (a) se emplea para roca de mediana dureza; la (b),

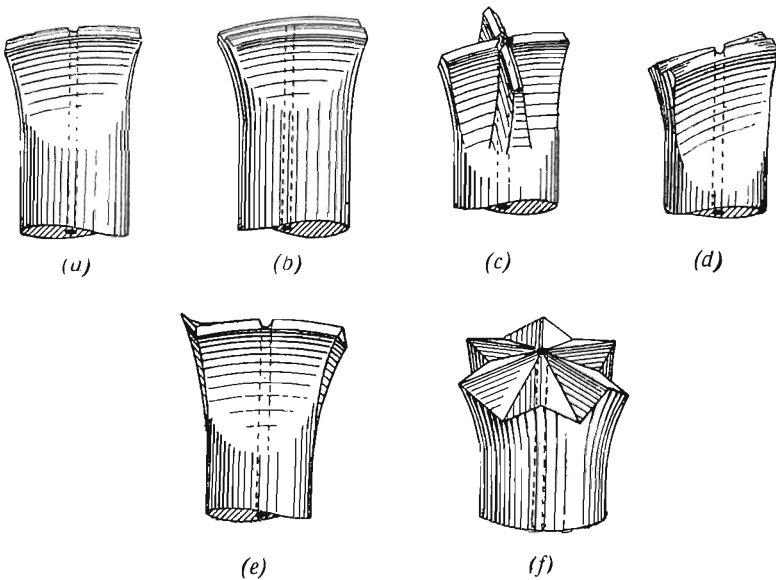


Figura 146.

de corte doble, para roca más dura; la (c), en cruz, o la (d), en X, para rocas duras y agujeros largos; la (e), en forma de Z, para rocas de mediana dureza fisurada, porque no queda la barrena atascada en el fondo del agujero, y, en fin, la forma de corona (f), para roca muy dura (figura 147).

El aire comprimido, para el movimiento de las perforadoras, se puede producir en compresores móviles o fijos. Los primeros, montados sobre un chasis con ruedas, se accionan normalmente por un motor

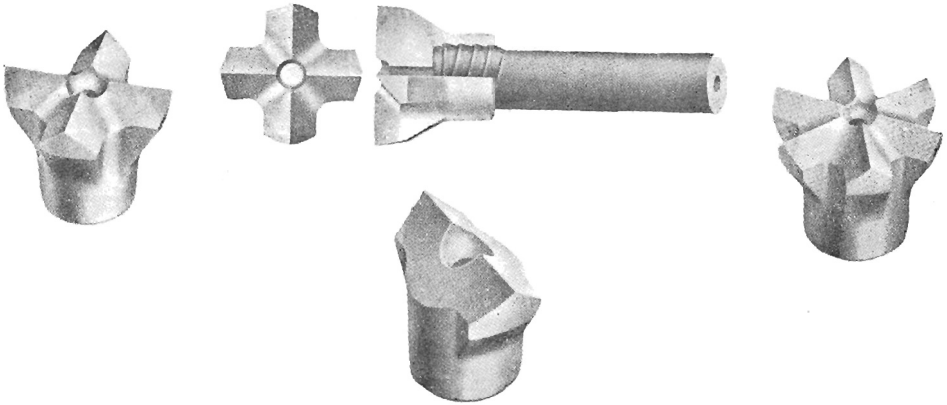


Figura 147.

Diesel o de gasolina; se emplean en trabajos de volumen relativamente reducido, donde el avance lineal es grande (fig. 148).

Cuando se trata de trabajos de gran volumen — especialmente para túneles —, la instalación del compresor es fija y el aire comprimido se distribuye, por medio de una tubería general, a todos los martillos; las instalaciones fijas están movidas por motor Diesel, eléctrico, y, en algunos casos, por máquinas de vapor; en trabajos de túneles, tienen la ventaja de que los motores se establecen fuera de la excavación, y, por tanto, los gases de su escape no vician el aire del interior del túnel; además, el rendimiento es mayor que en instalaciones móviles; la excavación fija tiene, en cambio, el inconveniente de precisar una longitud importante de tuberías de aire a presión, lo cual representa no solamente un gasto de establecimiento de consideración, sino el peligro de fugas, si la conservación no es muy cuidadosa, cosa difícil en trabajos de este género, donde las tuberías, inevitablemente, han de estar expuestas a movimientos y golpes.

La presión precisa, varía según la dureza de la roca; para roca de

mediana dureza, conviene la presión de 4 atmósferas, no siendo recomendable bajar de esta cifra, porque desciende mucho el rendimiento del trabajo. Para rocas duras, llega hasta 6-7 atmósferas.

El consumo de aire comprimido o, mejor dicho, del aire aspirado por cada martillo perforador, depende de la naturaleza de la roca, de la longitud de la tubería de alimentación, por las pérdidas a que inevitablemente está sometida, del rendimiento de la máquina utilizada, y de la pericia con que el trabajo se lleve. Como término medio, puede

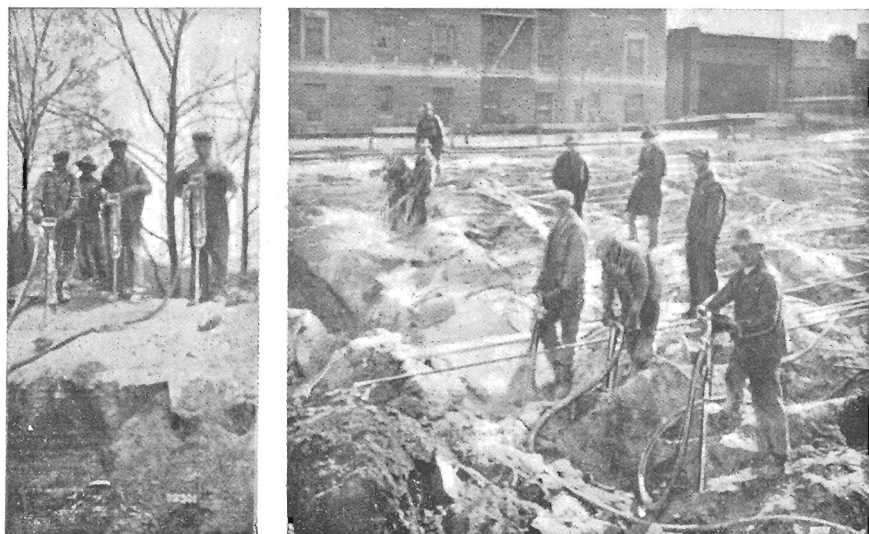


Figura 148.

considerarse un consumo de 1 a 2 m.³ de aire por minuto, a 5 atmósferas de presión, por cada martillo.

El aire, a la salida del compresor, debe ir a un depósito regulador, para compensar las inevitables diferencias de consumo de los martillos; el depósito debe ser de una capacidad de dos a tres veces el volumen absorbido por minuto por la totalidad de los martillos.

Los compresores pueden ser de simple o doble compresión, y ésta efectuarse en un cilindro o en dos, siendo, en este último caso, un cilindro de baja presión y otro de alta. Para instalaciones hasta 20 m.³ por minuto, se podrá adoptar un compresor de cilindro único, con compresión simple o doble; para instalaciones mayores, conviene adoptar compresores de dos cilindros, para lograr una mayor seguridad y un mejor rendimiento. Para presiones superiores, de 8 a 15 atmósferas, se

adoptan compresores de triple compresión. En los últimos años, se han empezado a emplear, en grandes trabajos de túneles, turbocompresores para cantidades de aire hasta 600 m.³ minuto y 12 atmósferas de presión.

El rendimiento de la perforación, hasta dos metros de profundidad, es el siguiente:

Roca blanda	3,5 a 5 m. l. hora.
" semiblanda	2 a 3 " "
" dura	1 a 2 " "
" muy dura	0.5 a 1 " "

Para profundidades mayores, el rendimiento disminuye muy rápidamente; en un trabajo normal, con jornada de ocho horas, sólo se barra durante seis y, por tanto, se debe contar con el 75 por 100 de los rendimientos antes indicados.

El número de metros lineales de barreno preciso por metro cúbico de excavación es el siguiente:

CLASE DE TRABAJO	Roca que parte bien	Roca que parte regular	Roca que parte mal
Canteras m. l. por m. ³	0.2	0,3	0,4
Frente abierto..... " "	0.3	0,5	0,7
Grandes excavaciones y túneles " "	0.7	1,0	1,5

Los diámetros necesarios para las tuberías de aire comprimido son los siguientes:

Para 2 martillos.....	diámetro	50 mm.
De 2 a 6 martillos	"	80 "
De 6 a 12 "	"	100 "
De 12 a 30 "	"	150 "

Las tuberías, cuando la conducción es corta (hasta 10 ó 15 m.), son flexibles; cuando existe una conducción de longitud importante, por ejemplo, siempre que se trate de instalaciones fijas, la tubería general es rígida, de acero, y termina de 10 a 15 m. antes de la cantera de ataque, en una llave de toma de aire, a la cual se enchufan los tubos flexibles (figura 149); estos tubos son de goma, reforzados exteriormente por una espi-

ral de acero; los tubos modernos están formados por una capa de goma, una o dos capas de lino y una capa de revestimiento exterior, resistente y tenaz.

Las pérdidas de carga en las tuberías de conducción de aire, con los diámetros señalados, pueden despreciarse, aunque la conducción sea larga; la mayor pérdida de rendimiento es debida, generalmente, a las fugas de aire, que es preciso vigilar y reparar con todo cuidado.

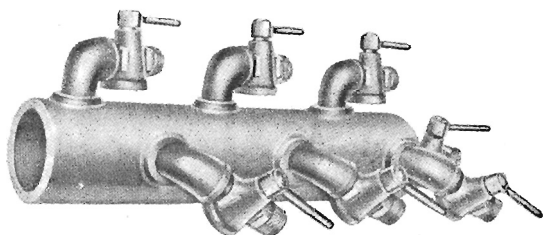


Figura 149.

163. El empleo de explosivos. -- Los explosivos son sustancias que, al quemarse, producen, en un tiempo brevísimo, una gran cantidad de gas; si el explosivo está encerrado en el fondo de un agujero practicado en la roca, la fuerza expansiva del gas origina una fuerte presión, que, venciendo la elasticidad, la cohesión y hasta el peso de la roca en la zona próxima al agujero, la quebranta y separa del resto.

La potencia de un explosivo depende:

1.º Del volumen de gas engendrado en relación con el volumen del explosivo.

2.º De la rapidez con que se desarrolla el proceso.

Los explosivos que se utilizan en la construcción de caminos, son:

a) Pólvora negra.

b) Preparados de explosión rápida (dinamita, gelatina y gelatina-dinamita).

Los explosivos para su empleo en la construcción de caminos, deben cumplir las siguientes condiciones:

1.º Poderse manipular con la máxima seguridad.

2.º Ser inalterables química y físicamente por largo tiempo.

3.º Ser inalterables por las variaciones de temperatura y la acción del agua.

4.º Soportar los golpes y sacudidas a que, inevitablemente, han de estar sometidos en su manejo y transporte.

5.º Su explosión no debe producir gases tóxicos, especialmente cuando se emplean en galerías.

6.º Deben ser suministrados en forma adecuada para su utilización, bien sea en polvo o como materia plástica.

En la excavación de túneles se emplean normalmente explosivos rápidos de alta potencia, por ser preciso que la fuerza de la explosión reduzca la roca a pedazos pequeños, para que sea fácil el descombro.

En canteras, cuando se trata de extraer roca sana que ha de utilizarse en la construcción, se debe emplear pólvora negra; pero, en este caso, como los gases producidos por la explosión son tóxicos, será preciso que la excavación pueda ventilarse fácilmente.

La tendencia moderna es emplear explosivos de máxima potencia y mínima producción de gases tóxicos; especialmente, en la excavación de galerías; hacer otra cosa es antieconómico.

164. Pólvora negra y explosivos similares. — La pólvora negra está compuesta, como término medio, del 70 por 100 de salitre (nitrato potásico); el 15 por 100, de carbón, y el 15 por 100, de azufre; el salitre es el elemento activo. Tiene un peso específico de 1,4 a 1,5.

La fuerza explosiva es de 400 a 500 atmósferas, y la temperatura de los gases de 2.700° C., aproximadamente; éstos son, anhídrido carbónico y ázoe, ambos tóxicos cuando están en proporción importante.

La explosión de la pólvora negra produce mucho humo, y, por tanto, hace imprescindible una ventilación enérgica, cuando se trata de trabajos en galería. Es insensible a las variaciones normales de temperatura, pero, en cambio, se altera fácilmente por la acción de la humedad; es preciso conservarla en sitio muy seco, y no puede utilizarse en barrenos que contengan humedad; este inconveniente hay que tenerlo muy en cuenta.

Los barrenos cargados con pólvora negra, por ser la explosión lenta, deben cerrarse perfectamente; ello se logra dejando un pequeño espacio sobre la carga, que se rellena, después de colocada ésta, con material escogido, generalmente esparto, bien comprimido, cerrando el resto con un tapón de arcilla.

La pólvora negra arde directamente por la acción del cebo, sobre el que actúa la mecha. Como la explosión es lenta, se obtienen pedazos de roca relativamente grandes.

165. Productos de explosión rápida. — Estos productos son la nitroglicerina, la dinamita, gelatina y gelatina-dinamita.

La nitroglicerina es un compuesto de glicerina, ácido nítrico y ácido sulfúrico; su potencia explosiva, que puede alcanzar 26.000 atmósferas, disminuye en proporción a las bases inertes que contenga. Es un líquido venenoso, de color claro amarillento; no es soluble en el agua, pero sí

en alcohol y éter; tiene la desventaja que se hiela entre $+6^{\circ}$ y $+8^{\circ}$ C. Su explosión produce anhídrido carbónico y ázoe y, cuando no se quema completamente, ácido nítrico.

La dinamita es un explosivo compuesto de nitroglicerina y tierra de infusorios, previamente calentada al rojo y después molida y tamizada; normalmente, la dinamita está formada por el 75 por 100 de nitroglicerina y el 25 por 100 de tierra de infusorios; con tierra de excelente calidad, se puede llegar a una proporción de nitroglicerina del 80 por 100. En esta forma, la nitroglicerina es mucho menos peligrosa y se puede manipular fácilmente. La necesidad de encontrar explosivos aun más potentes, llevó a sustituir la base inerte— tierra de infusorios — por una base activa, el nitrato de celulosa; la proporción es 90 al 93 por 100 de nitroglicerina y el 10 al 7 por 100 de nitrato de celulosa. Es una sustancia gomosa, de color amarillo claro, con una densidad de 1,55 a 1,60. Solamente se emplea con rocas extremadamente duras; con rocas normales da un rendimiento escaso. Si a la nitroglicerina se añade menos de un 7 por 100 de nitrato de celulosa, se forma una materia viscosa que se denomina aceite de gelatina. La gelatina-dinamita está formada por una mezcla del 40 al 90 por 100 de aceite de gelatina, del 3 al 6 por 100 de nitrato de celulosa y, el resto, de una mezcla formada por el 70 a 80 por 100 de salitre y el 30 a 20 por 100 de harina de carbón. Se obtienen así diversos explosivos, con potencia diferente.

Existen, además de estos explosivos normalmente usados, otros formados a base de cloratos, percloratos y nitrato de amoníaco. Últimamente se ha empezado a emplear el aire líquido en la excavación de túneles; los inconvenientes que su empleo presenta, no permiten todavía considerarlo como explosivo de uso normal; solamente en instalaciones de gran volumen, puede estudiarse la posibilidad de su utilización, siempre con grandes precauciones.

166. Polvorines.— Los depósitos de dinamita o polvorines deberán, según la cantidad de explosivo, estar a determinada distancia de los lugares habitados y de las carreteras frecuentadas por el tráfico; deben asimismo estar debidamente protegidos con muros cortafuegos y palizadas a su alrededor, si la cantidad de explosivos es de consideración.

El edificio deberá tener muros de fábrica y habrá de estar bien ventilado y cubierto con un techo ligero. El suelo debe ser de madera, construido sobre una cámara de aire; las paredes, hasta la altura de 2 metros, deberán estar forradas de madera. Las ventanas, cerradas por una reja de madera y protegidas con una tela metálica, para evitar la entrada en

el polvorín de ratas o topos, que se comen la dinamita, que tiene gusto dulce. Todos los polvorines deberán estar provistos de pararrayos.

167. Potencia de los explosivos. — Los valores prácticos de potencia de los diferentes explosivos, normalmente usados en la construcción de caminos, son los que se indican en el cuadro siguiente:

EXPLOSIVOS	Calor producido por un Kg. de explosivo — Calorías	Energía — m./Kg.	Valor en relación a la gelatina = 100
Gelatina (7 % de nitrato de celulosa).	1.640	700.000	100
Nitroglicerina	1.580	670.000	96
Dinamita (70 % de glicerina).....	1.290	550.000	79
Pólvora negra	685	290.000	41

168. Mecha y detonadores. — La explosión se produce por medio de la mecha y el detonador. La mecha es una cinta de cáñamo, tejida en forma de tubo, de 4 a 5 mm. de grueso, impregnada de alumbre o acetato de plomo y que lleva en su interior un hilo de pólvora negra, de 2,5 mm. de diámetro; exteriormente está protegida por una capa de alquitrán, asfalto o colofonia; cuando la mecha ha de emplearse en agua, debe ir revestida de goma. Es preciso conocer a qué velocidad se quema la mecha, para deducir el momento en que se producirá la explosión del barreno; la velocidad varía, según los distintos tipos de mecha, de 90 a 120 centímetros por minuto.

En los explosivos que precisan detonador, éste puede hacerse explotar por la acción de la mecha o bien eléctricamente.

Los detonadores comunes consisten en unos pequeños tubitos de cobre, rellenos de fulminato de mercurio, o clorato de potasa; la mecha enciende el fulminato de mercurio, y éste hace estallar la carga; el detonador puede también encenderse eléctricamente. Los detonadores eléctricos pueden ser:

a) Detonadores que inflaman por medio de una chispa eléctrica; requieren tensión elevada, 3.000 voltios, pero un amperaje mínimo (figura 150, a).

b) Detonadores que inflaman por medio de un hilo de platino muy fino que se pone incandescente al paso de una corriente eléctrica (figura 150, b); con un hilo que tenga una resistencia de 0,3-1,2 ohmios, se precisa una corriente de 0,5-0,8 amperes y una tensión de 0,5-2 voltios.

c) Detonadores eléctricos combinados, que pueden inflamar por

chispa o por incandescencia. Para ello el espacio entre los extremos de los hilos se rellena de una masa, a la cual se le da la resistencia y conductibilidad precisa, para que pueda el detonador inflamarse por chispa o por incandescencia. Este tipo de detonadores puede emplear corriente que varíe de 0,1 a 0,05 amperes y 6-10 voltios a 0,002-0,0002 amperes y 30-100 voltios.

La corriente necesaria se produce por pequeños generadores electrodinámicos, de diferentes tipos, que pueden llegar a inflamar hasta 80 detonadores al mismo tiempo.

Cuando se quiere dar fuego a los barrenos eléctricamente, pueden éstos conectarse en serie o en paralelo; en el primer caso, la interrupción de la corriente en un barreno deja sin prender a todos los que vienen después; con la disposición en paralelo, los distintos barrenos son independientes y la interrupción de uno de ellos no produce la de los demás.

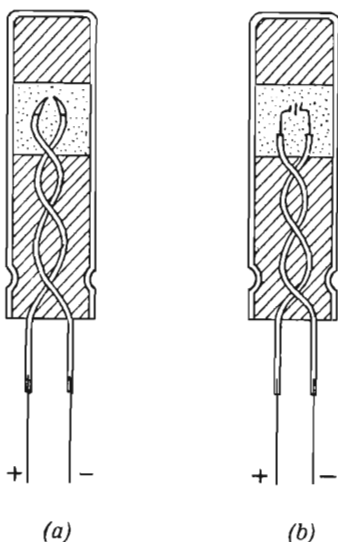


Figura 150.

Cuando se quiere que los barrenos exploten con intervalos previamente fijados, se calcula la longitud de las mechas respectivas para que así sea.

169. Efecto de la explosión. Disposición de los barrenos.—

Cuando la explosión de un barreno se produce en una masa ilimitada, compacta y homogénea, dotada de una cierta resistencia, el efecto de la explosión disminuye a medida que nos alejamos del punto *C*, donde se supone concentrada la carga del barreno. Supongamos que la explosión tiene lugar en una masa rocosa, limitada por una pared (fig. 151); fuera de la esfera III no se habrá producido modificación alguna en la roca; en la zona III, la roca quedará agrietada; en la II, rota en pedazos gruesos, y en la I en pedazos menudos.

El efecto del barreno habrá producido en la roca la verdadera excavación del cono *ACB*, cuyo material no solamente ha sido roto, sino que se habrá lanzado fuera; el cono de máximo rendimiento será aquel en el cual el ángulo *ACB* sea 90° , o sea que la altura sea igual al radio de la base; su volumen valdrá:

$$V = \frac{\pi}{3} h^3 = 1,05 h^3 .$$

Este cono se denomina cono normal; para una determinada profundidad de barreno, la carga racional será la que produzca un cono normal de explosión.

Si en una pared libre, en vez de un solo barreno se hacen dos, de manera que sus conos normales se superpongan, se producirá no solamente la excavación de los conos normales, sino también, en la segunda

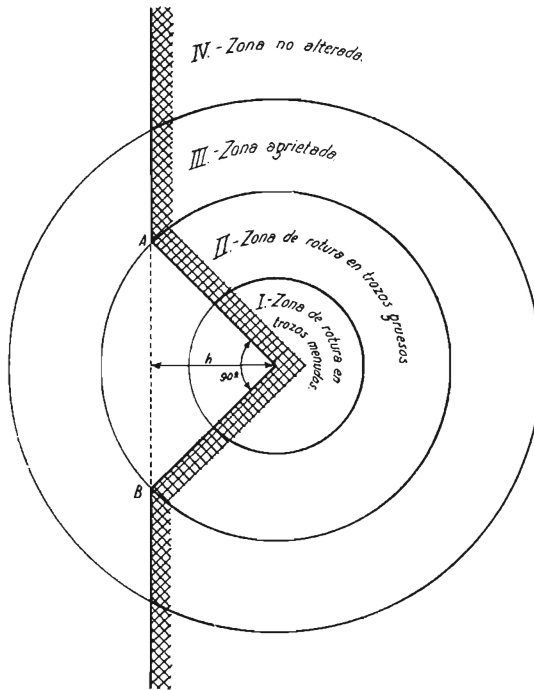


Figura 151.

explosión, la del comprendido entre ambos, aumentándose así considerablemente el rendimiento. Si el número de barrenos se aumenta a 4, ocurrirá lo mismo; la excavación no será cuatro veces el cono normal, sino que podrá llegar a siete veces.

En la práctica, la roca no será homogénea, y las esferas de acción de la carga serán sustituidas por superficies elipsoidales; los conos normales de explosión adoptarán la forma de la figura 152.

Los agujeros de los barrenos es conveniente sean lo mayores posible, aumentando su diámetro a medida que la dureza es más elevada; en roca muy dura, granito, pórfido, etc., el diámetro debe ser de 60 a 90 milímetros; en roca de dureza media, no estratificada, de 45 a 60 mm.;

en roca de dureza media estratificada, de 30 a 45 mm. Los datos anteriores sólo son aproximados; lo más recomendable es, al iniciar los trabajos, determinar, experimentalmente, el diámetro de barreno más conveniente.

En la roca estratificada es preciso tener muy en cuenta la forma de practicar los barrenos; si se ejecutan normalmente a la dirección de la

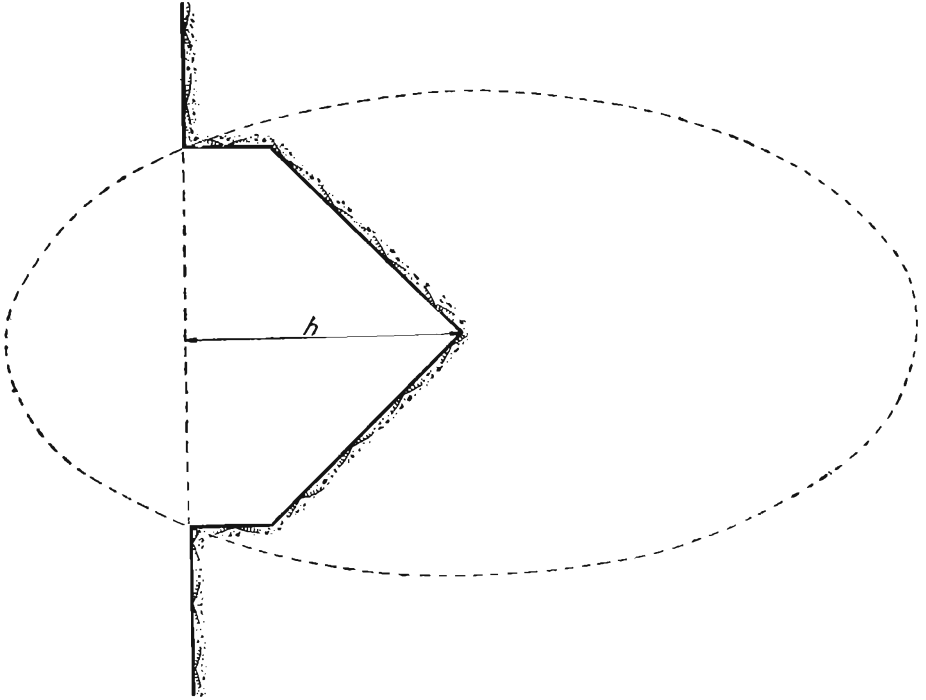


Figura 152.

estratificación, se corre el peligro de que los gases de la explosión puedan escapar por las juntas de los estratos, que son superficies de mínima resistencia, produciendo un efecto pequeño; los barrenos deberán practicarse en la forma que se indica en la figura 153.

Cada barreno se dispone como muestra la figura 154; los cartuchos de dinamita se introducen uno a continuación del otro en el barreno, y sobre ellos se coloca el detonador, en el cual previamente se ha introducido la mecha; en agujeros húmedos, para evitar la entrada del agua en el detonador, se rodea de una pequeña cantidad de grasa la entrada de la mecha en el mismo.

La fuerza desarrollada por un explosivo es proporcional a su peso, y como el volumen de la excavación es proporcional a la tercera poten-

cia de la profundidad del barreno, el peso de la carga debe aumentar proporcionalmente al cubo de la profundidad del barreno; es decir, que tendremos que $C = K \times h^3$, en la cual C es la carga en kilogramos; h , la profundidad del barreno en metros, y K , un coeficiente que debe determinarse experimentalmente para cada clase de roca, con un barreno de ensayo; este coeficiente, K , vale como término medio, según LANER:

Para roca blanda y que rompe fácilmente.....	$K = 0,1$
Para roca de dureza, media dureza y que rompe más difícilmente	$K = 0,2$
Para roca muy dura y muy tenaz.....	$K = 0,3$

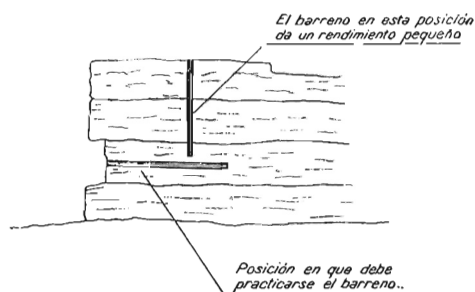


Figura 153.

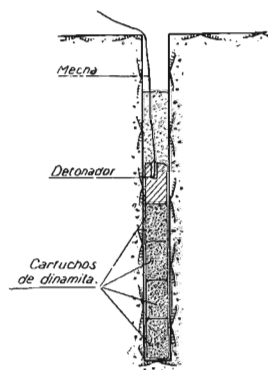


Figura 154.

Los coeficientes anteriores sólo son aplicables para la excavación en trinchera a cielo abierto; en excavación en galería los consumos son bastante mayores, aumentando a medida que disminuye la sección de ésta; en el capítulo de túneles se estudia este extremo con todo detenimiento.

① **170. Organización de los trabajos de desmonte.** — Como el volumen de tierras a mover es, en general, la mayor partida del presupuesto, la organización racional de la excavación y transporte, con el fin de realizar los trabajos con el mínimo coste y la mayor celeridad, es fundamental. Estudiada cuidadosamente la compensación de tierras, elegiremos los medios de excavación y transporte más adecuados desde el punto de vista económico; es preciso que sean los suficientes y estén debidamente coordinadas, la excavación, la carga, el transporte y vertido, para alcanzar su máximo rendimiento, y, por tanto, la mayor economía;

los medios a utilizar han de ser suficientes, pero no debe perderse de vista que un exceso de material o un medio inadecuado, por su categoría, al volumen y calidad de trabajo, pueden resultar antieconómico; hay que tener en cuenta que un exceso de elementos es inútil, y que los gastos

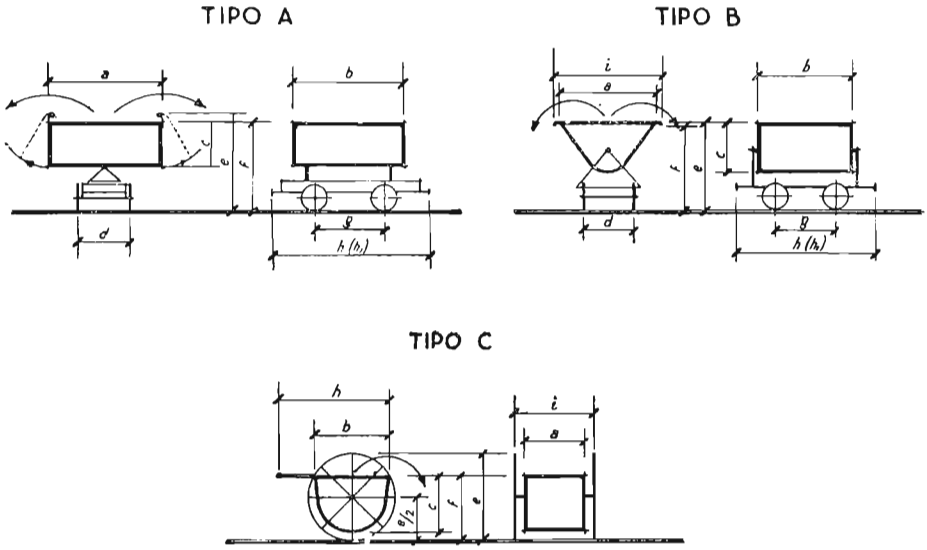


Figura 155, a.

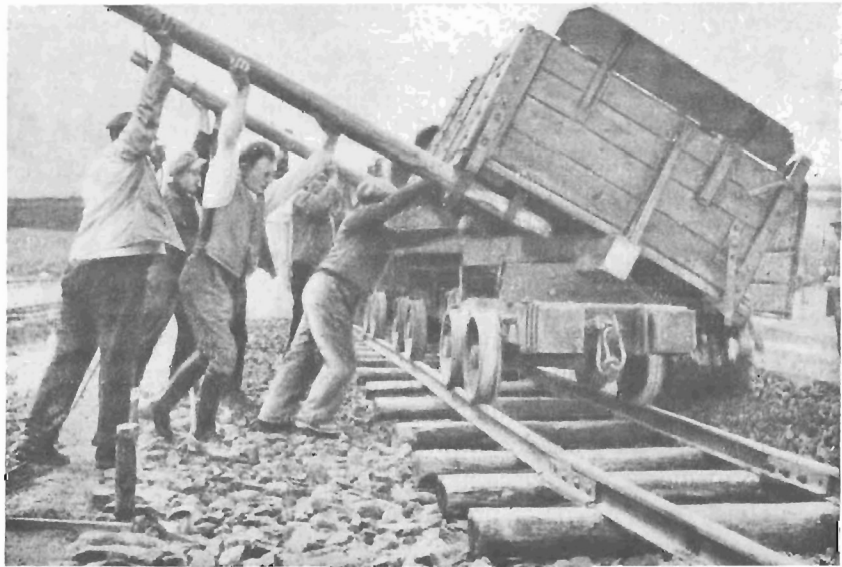


Figura 155, b.

de establecimiento de la instalación (incluyendo en ellos los del transporte de los medios a obra), así como la amortización del material, han de repartirse entre el número de metros cúbicos que se han de mover, y que si éstos son pocos, estas partidas gravarán excesivamente el coste de la obra.

Se deberá empezar por realizar aquellos tramos en los que exista compensación transversal, teniendo en cuenta que esta labor exige medios de transporte mínimos.

Cuando se trata de efectuar compensación longitudinal y el trabajo es de cierta consideración, la labor habrá de realizarse con vagonetas movidas a mano, con caballerías o con tracción mecánica, según la distancia del transporte y el volumen de tierras a mover.

Los vagones o vagonetas corrientemente empleados son volquetes; el esquema de los diferentes tipos puede verse en la figura 155, *a*; las características normales se resumen en la tabla siguiente:

Tip	Cabida — m. ³	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>h</i> ₁ con frenos	<i>i</i>	Peso en vacío Kgs.
A	1,25	1.500	1.500	560	600	1.450	1.322	600	2.100	2.400	1.760	810
	1,50	1.500	1.600	600	760	1.480	1.357	600	2.230	2.530	1.720	960
	2,00	1.500	1.750	650	600	1.780	1.430	800	2.600	—	1.740	1.350
	—	—	—	—	—	—	—	850	—	2.900	—	—
B	0,50	1.250	1.090	595	500/600	1.010	960	500	<i>d</i> 500=1.650 <i>d</i> 600=1.690	<i>d</i> 500=2.170 <i>d</i> 600=2.190	1.310	300
	0,75	1.440	1.250	710	500/600	1.135	1.085	525	<i>d</i> 500=1.820 <i>d</i> 600=1.857	<i>d</i> 500=2.340 <i>d</i> 600=2.360	1.510	340
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C	0,10	500	600	450	—	1.000	700	—	1.300	—	900	100
	0,20	600	700	580	—	1.000	745	—	1.300	—	1.000	125
	0,30	600	900	700	—	1.000	800	—	1.300	—	1.000	140

Todas las dimensiones en mm.

Para grandes trabajos de movimiento de tierras pueden emplearse vagones, volquetes o no, de mayor capacidad; en el primer caso pueden volcar de frente, o, más corrientemente, de lado; sus cartelas son abatibles en la mayoría de los tipos (fig. 155, *b*).

Las características de la vía son las que se resumen en el siguiente cuadro:

TRACCION	VIA ARMADA CON TRAVIASAS METALICAS ANCHO, 600 MM.			VIA SOBRE TRAVIASAS DE MADERA				
	A mano	LOCOMOTORAS		Ancho, 600 mm.		Ancho, 900 mm.		
		Ligera	Pesada	LOCOMOTORAS				
				Ligera	Pesada	Ligera	Pesada	
Peso del m. l. de carril, Kg.	9	12-14	12-14	12	14	24,50-27,50	32,50	
Número de traviesas por m. l. ...	1	1	2	1,33	1,33	1,33	1,33	
Peso de los elementos metálicos por m. l. de vía (1), Kg.	24	37	50	26	31	54-60	74	
Agujas..... {	5	Longitud m.	5-7	5-7	5-7	5-7	15	15
		Peso Kg.	250	300-450	350-500	300-450	350-500	2.500

(1) En la vía armada, peso total; en la vía sobre traviesas, con exclusión de éstas.

Las traviesas de madera son de alturas variables, de 12 a 15 cm. y deben tener una longitud igual al doble del ancho de la vía.

El coste de montaje por m. l. de vía puede estimarse en:

Vía armada, 600 mm. de ancho.	}	Tracción a mano.....	0,6 horas peón, m. l.		
		" con locomotoras ligeras.	0,6 " " "		
		" con id. pesadas.....	0,8 " " "		
Vía sobre traviesas.....	}	Ancho, 600 mm.	{	Tracción con locomotoras ligeras	1,2 horas peón.
				Idem pesadas...	1,4
		Ancho, 900 mm.	{	Tracción con locomotoras ligeras	1,5 " "
				Id. id. pesadas.	1,8

Tanto en un caso como en otro, las vías se mueven de su posición sin desarmar, empleando barrotos para apalancar, en la forma que se puede ver en la figura 156.



Figura 156.

La organización general del trabajo se suele hacer por uno de los métodos siguientes:

171. Ataque frontal o en cuneta.— Se abre una trinchera en el frente de la excavación (fig. 157) con la cota definitiva, los taludes lo más verticales posible y el ancho estrictamente preciso para que pueda establecerse una vía de servicio; la trinchera se va ensanchando poco a poco, haciendo la carga de las tierras a los trenes colocados lateralmen-

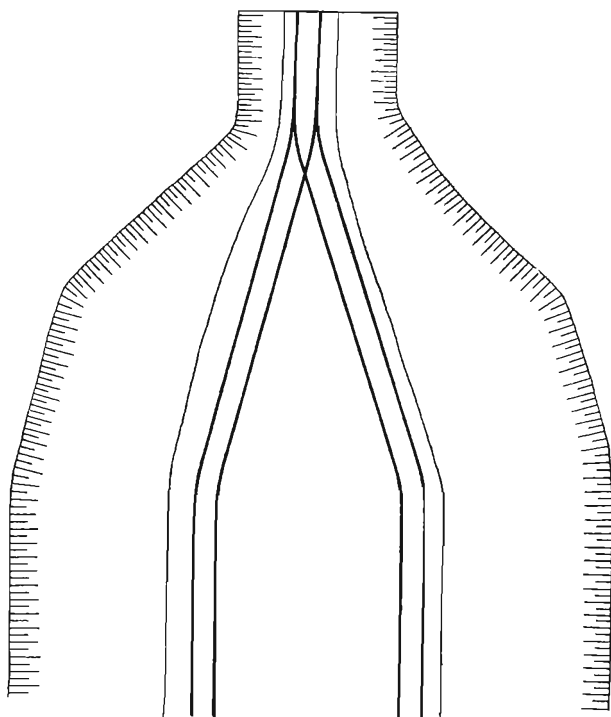
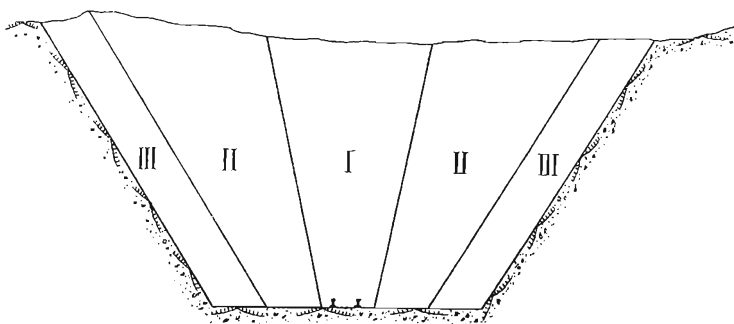


Figura 157.



Figura 158.

te (fig. 158); cuando el ancho es el suficiente, para colocar una segunda vía, se coloca y se continúa ensanchando, hasta el perfil transversal definitivo. Este método es lento; el material de transporte se mueve difícilmente y el ataque se hace en un frente reducido.

172. Ataque lateral por capas sucesivas. — Es el que normalmente se emplea; en vez de tener, como sucede con el método anterior, el reducido frente de trabajo de la sección transversal del camino, se ataca la excavación lateralmente, buscando un amplio espacio que permita, no sólo la labor de excavación con distintos puntos de ataque, sino la de carga en trenes formados por un número considerable de vagonetas. El trabajo puede desarrollarse mucho más rápidamente, y es el único que

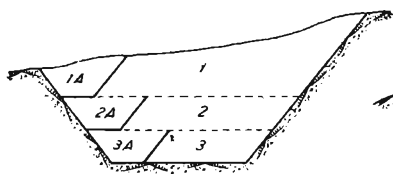


Figura 159, a.

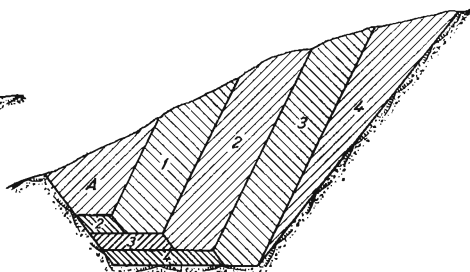


Figura 159, b.

es posible emplear cuando su volumen es tal que exige para el transporte de tierras el empleo de trenes de vagonetas con tracción mecánica.

El trabajo se inicia en una faja lateral, del ancho estrictamente necesario para la colocación de una vía a lo largo de todo el proyectado frente de ataque, hecho lo cual se acomete el trabajo de excavación, bien por capas horizontales, o bien verticales; en el primer caso (fig. 159, a), hecha la excavación de ataque, 1 A, se continúa el trabajo, excavando horizontalmente toda la zona lateral, 1, hasta el ancho total, con la profundidad de la excavación de ataque; una vez excavada así la primera capa, se atacan las demás de idéntica manera; esta forma de trabajo es recomendable en caso de que el terreno no tenga una fuerte pendiente transversal, pues si esto sucede, la excavación de la primera capa llega a tener una altura excesiva, que no permite la carga en una sola operación a mano, o con la excavadora, de las vagonetas de transporte. Por ello, cuando el terreno tiene una fuerte pendiente transversal, se recurre al procedimiento de excavación por capas verticales, en la forma de la figura 159, b. Se excava la primera trinchera de ataque, A; hecho lo cual,

y colocada en ella la vía de transporte, se excava la capa vertical, 1, llevando la excavación hasta el máximo perfil que permita la carga directa de los productos obtenidos, al tren de vagonetas colocado en la trinchera de ataque; hecho esto, se coloca la vía en el fondo de la excavación de la primera capa vertical excavada y se procede a excavar la segunda, y la parte restante de la trinchera de ataque, y así se continúa por capas verticales consecutivas hasta completar la totalidad de la sección transversal proyectada.

La vía se debe disponer en forma que la maniobra de los trenes pueda hacerse con la mayor rapidez y con un mínimo de movimientos; la



Figura 159. c.

disposición a adoptar, dependerá del plan de trabajo y del material disponible; corrientemente se emplea la que se indica en la figura 159, c; el tren llega del terraplén a la vía I con la máquina en cabeza; se suelta la locomotora, que hace la maniobra pasando por la vía directa a colocarse en cola, y en esta posición lleva al tren al frente de ataque; mientras éste carga, otro tren, después de haber descargado en el terraplén, puede hacer la maniobra, para estar dispuesto a entrar con la máquina en cola en la vía del frente de ataque cuando salga cargado el primero. El trabajo puede llevarse en esta forma cuando el sistema empleado para excavación y carga permita hacer ambas operaciones con gran rapidez. Cuando el tiempo empleado en la carga tenga que ser relativamente grande y la distancia de transporte de las tierras pequeña, será preciso sólo una máquina. En este caso, existirá en el frente de ataque un tren de vagonetas cargado, sin locomotora; otro segundo tren llegará del terraplén a la vía de cruce, quedando en la I como en el caso anterior; desenganchada la máquina irá a buscar al tren que está en el frente de ataque, ya cargado, y lo llevará a la posición II, hecho lo cual, en cola llevará al primer convoy a la posición de carga, y volverá, pasando por la vía I, a colocarse en cabeza del tren ya cargado, para conducirlo al punto de destino de las tierras.

173. Ejecución de los terraplenes. — Como principio general, se ha de tener en cuenta que, a ser posible, la tierra para la formación de los terraplenes se debe verter por tongadas horizontales, de un espesor

no muy grande, de 0,30 a 0,40 m.; se recomienda el reparto de tierras con pequeño espesor, para favorecer la labor de consolidación, de gran importancia para la rápida utilización de la vía; un terraplén mal construido no permite el establecimiento del firme definitivo, ni de las superestructuras del ferrocarril en un plazo relativamente grande—un año, como mínimo—, y esta circunstancia puede, en muchos casos, causar un grave trastorno económico.

La organización del vertido de las tierras ha de estudiarse cuidadosamente, para que se pierda el menor tiempo posible. La brigada para el vertido de tierra, tratándose de vagonetas arrastradas con locomotoras, se debe componer, para trenes normales, de diez a doce hombres, y cuando se trata de transportes de gran volumen, es preciso llegar hasta treinta hombres. La debida utilización de este personal, exigirá que esté el menor tiempo parado. Cuando el transporte se hace con carros y camiones, como el volumen de tierras por unidad de tiempo es mucho menor, será también más reducido el personal preciso para el vertido, muy variable, según la forma en que esté organizado el transporte, pero que no bajará, como término medio, de cuatro peones y el capataz.

Cuando el terraplén se forma con tierras transportadas por camiones o carros, la organización del trabajo dependerá de la manera de verter de los vehículos que lo realizan; los carros, corrientemente, suelen verter por detrás, soltando las varas de enganche y haciendo volcar el carro; los camiones, si son volquetes, vuelcan también en general por detrás; en los camiones fijos, se bajan las cartelas, descargando lateralmente, a pala, el contenido; tanto en un caso como en otro, es imprescindible disponer un ensanchamiento de la explanación, lo suficientemente cerca del punto de descarga, para que el vehículo pueda hacer las maniobras necesarias para verter su carga en el punto preciso; hay que evitar, para carros y camiones, el excesivo recorrido marcha atrás que es lento y peligroso.

En caso de transporte con vagonetas, es preciso disponer las vías en forma tal, que la descarga de los trenes se pueda efectuar rápidamente; como las vagonetas se vuelcan lateralmente, la disposición más corriente consiste en construir un espigón de tierra del ancho preciso para montar una vía, a partir del punto de paso de desmonte a terraplén; los trenes entran en este espigón con la máquina en cola, y las vagonetas van vertiendo a uno y otro lado, para aumentar el ancho del terraplén; a medida que esto ocurre, las vías se van corriendo, para que siempre la tierra de los trenes vaya vertiendo prácticamente en su sitio, sin necesidad de moverla a mano, después de vertida. En algunos casos, el espigón de tierra se sustituye por uno de madera, que puede ser fijo o móvil;

en el primer caso, la mayor parte del material empleado en la construcción, se pierde, por quedar enterrado en el terraplén.

174. Los distintos materiales para la formación de terraplenes. Sus propiedades fundamentales. — Un terraplén, en el momento de su construcción, está formado por una masa de material de cohesión muy pequeña o nula; la tierra, al excavar, se disgrega, y al formar el terraplén, no sólo el volumen de huecos que el material presenta es muy grande, sino que su cohesión es prácticamente nula; para que el terraplén adquiera la estabilidad precisa, es necesario que *los huecos desaparezcan*, y que el relleno, al alcanzar la máxima densidad, tenga también la cohesión necesaria para que sea prácticamente inalterable su volumen y su forma. La máxima densidad se alcanzará haciendo desaparecer los huecos que el material contenga; y esto se logra, apisonando hasta que adquiera la máxima compacidad posible, según su naturaleza. En lograr la compacidad desempeña papel preponderante el agua que contiene el terreno; el agua se puede presentar en forma de película adherida fuertemente a la superficie o agua coherente, o bien como agua libre, o agua capilar, no solamente rodeando las diferentes partículas sino rellenando los huecos que entre ellas quedan; la primera, difícilmente puede separarse de la superficie de las diferentes partículas, a las que se adhiere con gran fuerza; el agua, en esta forma, no rellena los poros. La segunda, el agua libre, no sólo rodea las partículas, sino que rellena los huecos que quedan entre los diferentes elementos, impidiendo la debida consolidación del terreno, si previamente no se expulsa; además, es un obstáculo para que el terreno a consolidar adquiera la debida cohesión. El agua coherente, no solamente no impide la consolidación del terraplén, sino que, actuando en cierto modo como lubricante, ayuda a que ésta tenga lugar. La cantidad de agua óptima, para que un terraplén se consolide rápidamente, depende de su naturaleza, pues según ella, el espesor del agua coherente será mayor o menor. Si queremos lograr la máxima compacidad con el menor esfuerzo y la mayor rapidez, habrá que determinar experimentalmente, en el Laboratorio, cuál será la cantidad de agua óptima que precisa el terreno que ha de formar el terraplén, y luego, en la ejecución de la obra, comprobar por ensayos periódicos si la compacidad que se alcanzó en la práctica está en relación con la que en el Laboratorio obtuvimos.

La determinación de la cantidad de agua óptima, para que la consolidación del terraplén tenga lugar, con un material determinado, se obtiene tomando una muestra del terreno a ensayar, de la cual debe separarse el material preciso, haciéndolo pasar por el tamiz de 1/4 de pulga-

da; de este material, bien mezclado, para que tenga la máxima uniformidad, se toma una muestra de unos 3 Kg. de peso, y con ella se rellena un cilindro de 10 cm. de diámetro y 12,5 cm. de profundidad, llamado molde Proctor (fig. 160, a), apisonando la muestra en tres capas, cada una con 25 golpes, desde una altura de 30 cm., con un peso cilíndrico de 2,49 kilogramos, que tenga un diámetro de 5,1 cm. El cilindro que se emplea

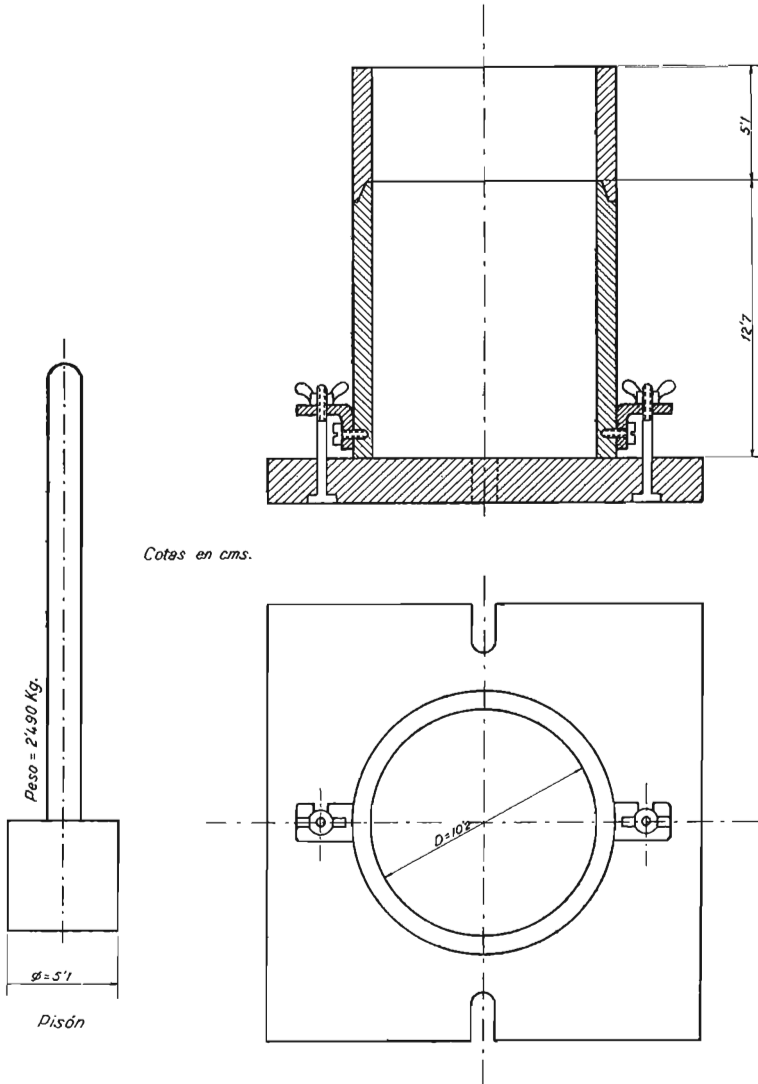


Figura 160, a.

como molde tiene un pequeño collarín suplementario, collarín que se quita una vez efectuado el apisonado para enrasar exactamente la muestra; el molde se asienta sobre una base, *B*, mediante tornillos a mariposa; como el volumen del cilindro es conocido, pesando la muestra se puede determinar su peso por unidad de volumen. Hecho esto, se determina la cantidad de agua de la muestra, desecando hasta peso constante a 125° C. La prueba se repite con distintas proporciones de agua y se construye una curva que tenga por abscisas la proporción de agua y por ordenadas los pesos por unidad de volumen obtenidos en la prueba; la abscisa correspondiente a la ordenada máxima de esta curva dará la proporción óptima de humedad para la más rápida y completa consolidación del terraplén. La proporción de humedad buscada estará en las proximidades de la necesaria para poder hacer a mano, una bola con el material a ensayar, que pueda romperse, sin desmenuzarse o pulverizarse, en pequeños pedazos; en la práctica varía entre el 7 y el 16 por 100. De cada muestra se debe medir la resistencia a la penetración, determinando la carga necesaria por centímetro cuadrado, para que una varilla redonda pueda penetrar en la masa a una velocidad de 4 cm. por segundo; en cada probeta, deberán hacerse tres ensayos de penetración y determinar la media; se construirá la curva, que tiene por abscisas la proporción de humedad y por ordenadas la penetración media de cada probeta. Determinada en el Laboratorio la proporción óptima de humedad y la máxima densidad, hay que comprobar en el campo que se alcanza después de consolidado el terraplén, una densidad aceptable, que normalmente debe ser el 90 por 100 de la determinada en los ensayos. Es preciso, por otra parte, conservar, durante la consolidación, la proporción de agua que teóricamente se ha fijado. Ambas condiciones se comprueban fácilmente en el campo; se toma una muestra del terraplén en construcción y se determina su densidad, pesando el contenido de un cilindro y dividiendo por su volumen; más exacto es el procedimiento seguido por algunos ingenieros, de tomar una muestra de terreno, que puede ser de forma irregular, muestra que se pesa inmediatamente después de extraída, determinándose su volumen, rellenando con arena el hueco que deja la muestra extraída, y obteniendo el peso por unidad de volumen. El grado de humedad se determina midiendo directamente en el terreno la penetración y entrando, con este dato, en las curvas dibujadas en el Laboratorio, que relacionan la penetración con el grado de humedad, para obtener ésta.

Para la determinación de la penetración en el terreno, se utilizan diferentes disposiciones, de las cuales, una de las más sencillas es la representada en la figura 160, *b*: un muelle dinamométrico determina, en

una escalilla, la presión total ejercida, que se reduce a carga unitaria por centímetro cuadrado, dividiendo por la superficie de las distintas varillas; las de mayor diámetro, se emplean para los terrenos de mayor penetración.

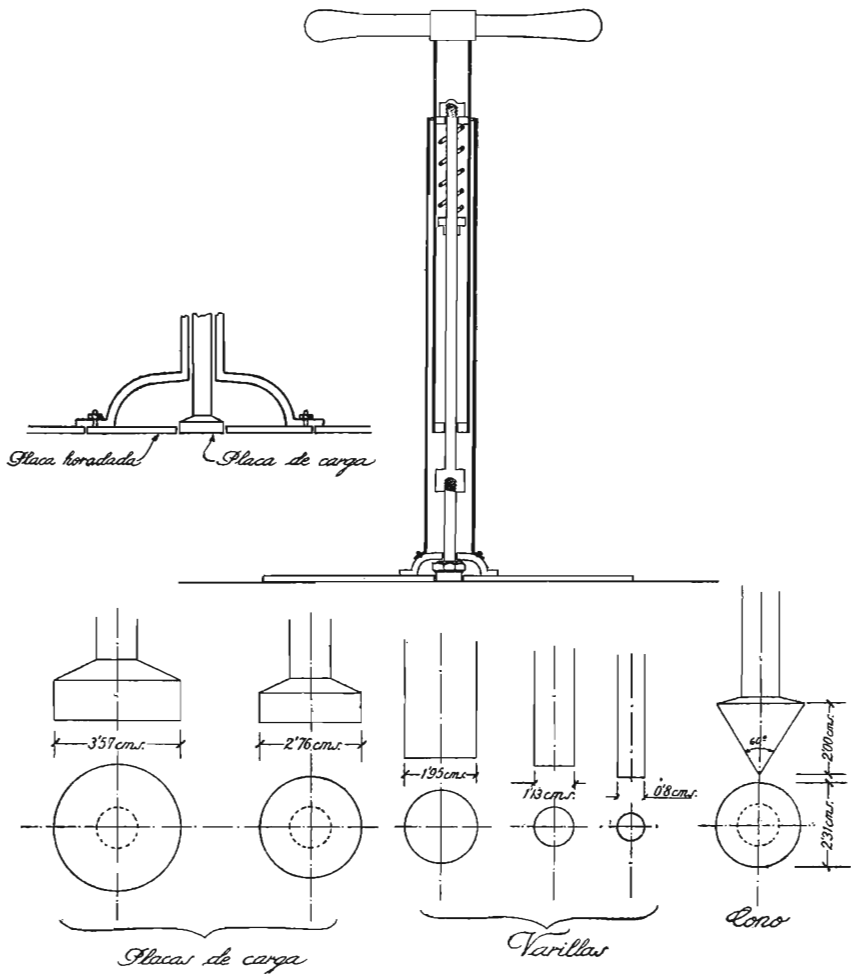


Figura 160, b.

En la mayoría de los casos, el procedimiento expuesto es suficiente; la tierra para la formación del terraplén, de no ser de pésima calidad, ha de proceder de los desmontes, pues otra cosa sería antieconómico; por tanto, es inútil querer llegar a composiciones granulométricas de

terreno que den unas características determinadas; el problema que al ingeniero se plantea es, simplemente, lograr la óptima utilización del material disponible; y a ello se llega en la forma expuesta. Si se quiere tener una idea del comportamiento posterior del material a emplear, se puede realizar la prueba del terreno a esfuerzo cortante, los límites de ATTERBERG y el ensayo de capacidad de duración a las alternativas de humedad y sequedad, hielo y deshielo. Así se acordó en el Congreso Internacional de La Haya, de 1938.

La determinación de la rotura a esfuerzo cortante, se mide con el aparato de CASAGRANDE (fig. 161); se compone de dos bastidores: el in-

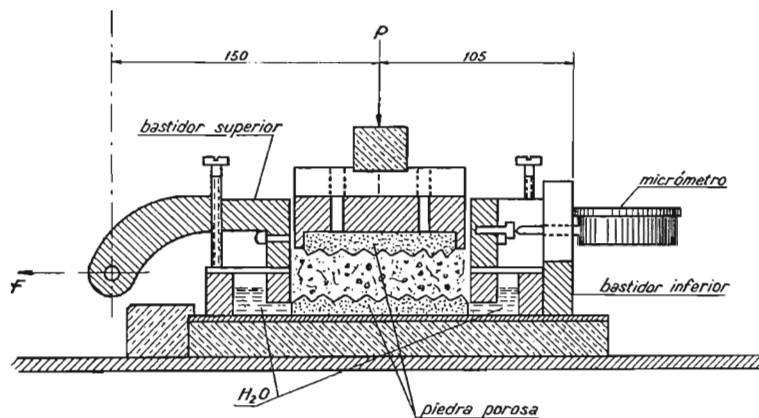


Fig. 161. — Esfuerzo cortante. Aparato CASAGRANDE.

ferior, fijo, y el superior, móvil por la acción de una fuerza, F ; entre ambos, y contenido por unas piedras porosas dentadas, se coloca el material a ensayar; antes de hacerlo se unta con vaselina el interior de la caja y la superficie de contacto entre ambos bastidores. Es muy importante que la muestra a ensayar tenga las dimensiones exactas de la caja del aparato, para evitar esfuerzos anormales al iniciarse la prueba; para ello, se suelen tener varios moldes, en los cuales se preparan las probetas sometiéndolas a cargas, que van gradualmente aumentando hasta 4 kilogramos por centímetro cuadrado; teniendo cuidado, si el material tiene alguna fluidez, de que no refluya por las juntas. Colocada la probeta a ensayar en el aparato, se ajustan los tornillos micrométricos para medir el posible asiento, por efecto de la carga. La prueba a esfuerzo cortante no se debe hacer hasta tanto que la muestra no esté completamente asentada; algunos terrenos necesitan, para lograrlo, varios días. Una vez

la muestra asentada, y con una carga vertical determinada, se aplica una fuerza horizontal, progresivamente, hasta la rotura, siendo los incrementos consecutivos de la misma a razón de 1/40 de la fuerza aplicada verticalmente. La relación de la fuerza horizontal y la vertical, medirá la $\text{tg } \varphi$ del ángulo de rozamiento interno del terreno; el valor del ángulo de rozamiento interno del terreno es variable según su naturaleza; para la grava y la tierra vegetal, oscila entre 30° y 40° ; para la arcilla con mezcla de arena, es alrededor de 20° ; para la arcilla seca, alrededor de 22° , y para la arcilla grasa, de 10° a 18° ; repitiendo la prueba con distintas cargas verticales y llevando en dos ejes coordenados, en las ordenadas y abscisas respectivamente, las cargas por centímetro cuadrado producidas por las fuerzas verticales y horizontales, aplicadas en el momento de la rotura, se tiene una línea que, sensiblemente, será una recta que corta el eje de las ordenadas en un punto que medirá la cohesión, de acuerdo con la fórmula de COULOMB, para materiales coherentes:

$$T = c + P \text{tg } \varphi$$

La cohesión es una fuerza interna del material, por la cual, unas partículas se unen a otras; normalmente se considera descompuesta en dos la efectiva y la aparente.

La cohesión efectiva es debida a la mutua atracción molecular de las partículas; depende de la presión a la cual ha estado sometido el terreno; según COULOMB es una constante del material, independiente de las fuerzas externas, que sobre él actúan.

La cohesión aparente es debida, según TERZAGHI, a la tensión capilar transmitida al terreno por el agua que contienen sus poros; es, por tanto, variable para un mismo material, según la cantidad de agua que contiene. La cohesión total que se mide, suma de las dos anteriores, no es una cantidad constante para un terreno determinado, sino que depende del estado de humedad en que el terreno se encuentra; su valor efectivo disminuye al disminuir el valor de la cohesión aparente; es peligroso, por tanto, pudiendo ser variables las condiciones físicas a las que ha de estar sometido el terreno, tener en cuenta la cohesión aparente.

Si se quiere medir la cohesión efectiva del terreno —la cohesión independiente de la debida a las fuerzas del agua capilar—, no hay más que llenar de agua destilada el depósito del aparato, agua que, al ponerse en contacto con la probeta a través de la piedra porosa, anula la tensión capilar que, eventualmente, pudiera tener el terreno; la prueba se realiza después en forma idéntica.

Valores medios de la cohesión en los materiales normalmente usados en la construcción de terraplenes, son los siguientes:

Tierra vegetal, compacta y seca.....	540 Kg./m. ²
" " con humedad natural.....	560 "
Arcilla compacta y seca.....	520 "
" con humedad natural.....	930 "
" con arena	860 "

Los límites de consistencia o de ATTERBERG, son:

- 1.º El límite líquido o de fluidez.
- 2.º El límite plástico.
- 3.º El límite de retracción.

El límite líquido o límite de fluidez determina la consistencia del terreno, para la cual éste se encuentra en el paso del estado fúido al

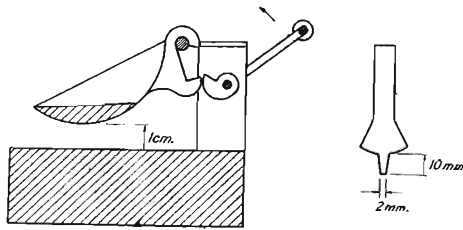


Fig. 162. — Límite líquido. Aparato CASAGRANDE.

estado plástico; se define por la cantidad máxima de agua que es posible añadir a un terreno para que no consienta su corrimiento por pequeñas sacudidas. Su determinación se hace con el aparato de CASAGRANDE, que está constituido por una cuchara metálica que, por un sencillo mecanismo, se deja caer repetidas veces sobre una base de ebonita, desde la altura de un centímetro (fig. 162). La prueba se efectúa colocando de 100 a 200 gramos de terreno a ensayar en la cuchara; con una espátula, cuya sección puede verse en la figura, se traza en la muestra una ranura de un centímetro de altura y dos milímetros de espesor. Se denomina límite de fluidez o límite líquido la cantidad de agua, en tanto por ciento, para la cual, después de 25 golpes de la cuchara sobre la placa de ebonita, la ranura se cierra en la longitud de un centímetro; el ensayo se realiza por tanteos, añadiendo más o menos agua a la muestra a ensayar, hasta alcanzar la consistencia debida. La prueba puede hacerse rápidamente, determinando, para tres o cuatro muestras, con distinta proporción de agua, el número de golpes que es preciso dar para

que la ranura se cierre un centímetro, y construyendo una curva, que tenga por abscisas el número de golpes, y por ordenadas, el contenido de agua; la ordenada correspondiente a 25 golpes determinará el límite de fluidez o límite líquido. El Instituto Sperimentale Stradale de Milán, en

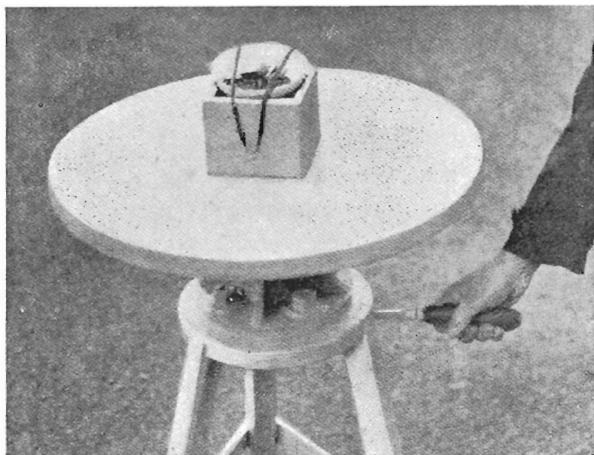


Fig. 163, a. — Límite líquido. Método del I. S. S.

vez de la cuchara móvil de CASAGRANDE, utiliza la mesa de sacudidas (figura 163); se toman 100 gramos del terreno, que pasa por el tamiz número 40 (malla de 0,42 mm. de diámetro); se mezclan bien por medio de una espátula y se colocan en la cápsula, haciendo que el espesor má-

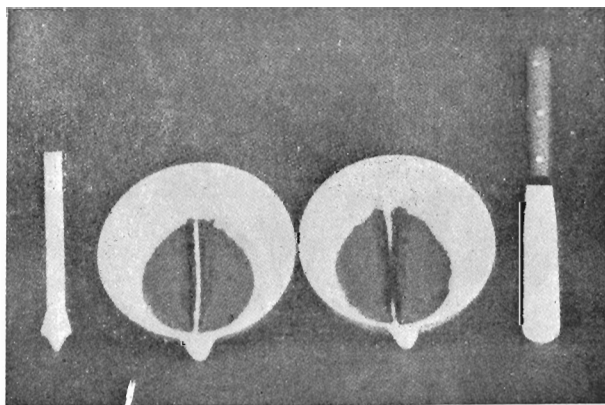


Fig. 163, b. — Límite líquido. Método del I. S. S.

ximo sea, aproximadamente, un centímetro; la cápsula se coloca en la mesa de sacudidas, sometiéndola a la acción de 25 golpes, con un centímetro de altura y velocidad de dos golpes por minuto. La determinación del límite líquido se hace como se ha indicado anteriormente. Los valores del límite líquido son muy diferentes, según la naturaleza del terreno; en la arcilla grasa es alrededor del 80 por 100; en la magra, del 25 al 40 por 100; en la arena, alrededor del 20 por 100, y en el terreno orgánico, llega a alcanzar el 250 por 100.

El límite plástico se caracteriza por la consistencia del terreno, en el paso del estado plástico al semisólido; se mide por la cantidad mínima de agua, en tanto por ciento, que precisa tener un terreno para que, con

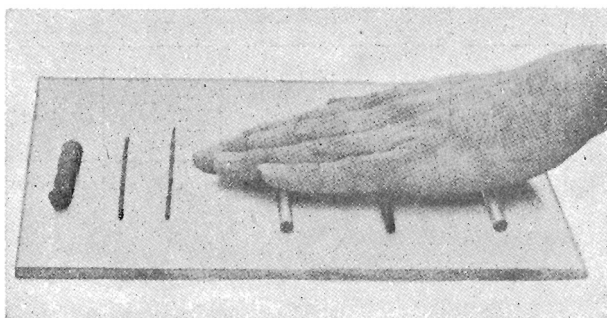


Fig. 164. — Límite plástico. Método del I. S. S.

la palma de la mano se pueda hacer, sin romperse, un cilindro de unos tres milímetros de diámetro; la muestra se prepara con una proporción cualquiera de agua, rodando el cilindro sobre el papel de filtro; éste va absorbiendo el agua que contiene, hasta que el cilindro se rompe por falta de humedad; en este momento se determina la proporción de agua que mide el límite de plasticidad. El Instituto Sperimentale Stradale hace la determinación de la manera siguiente: 15 gramos de tierra seca, que pasa por el tamiz número 40, se mezcla con agua destilada, hasta que adquiera la plasticidad necesaria para que pueda ser arrollada con una pequeña presión de la palma de la mano, sobre una placa de vidrio, hasta reducirla a un cilindro de tres milímetros de diámetro; si el cilindro se rompe antes de alcanzar el diámetro deseado, se añade agua, y se repite la operación (fig. 164). Se determina la proporción de agua, refiriéndola al peso del terreno seco; la arcilla magra tiene un límite plástico de 25 por 100; la grasa, de 30 por 100, y el terreno orgánico, de 150 por 100.

La diferencia entre el límite de fluidez y el límite de plasticidad se llama índice de plasticidad; define la zona en la que el terreno se encuentra en estado plástico y está ligado con el valor del rozamiento interno del terreno (fig. 165); puede servir para dar idea de la resistencia a esfuerzo cortante, sin tener necesidad de realizar este ensayo (FREIBERG).

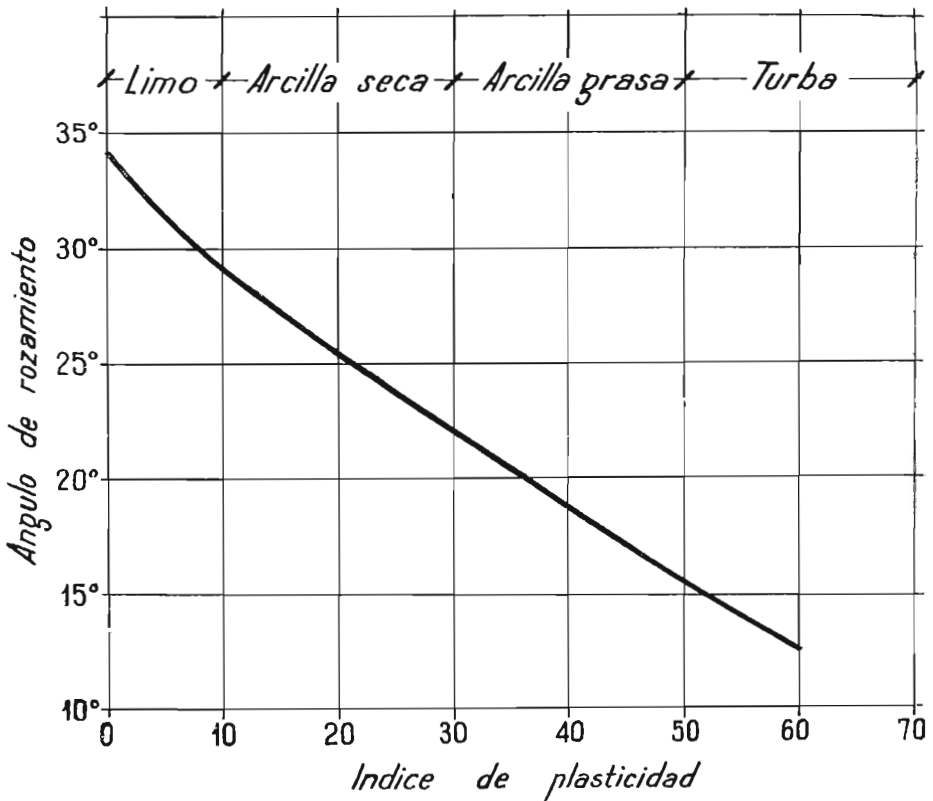


Figura 165.

El límite de retracción es la consistencia del terreno cuando alcanza su estado sólido, y se caracteriza por el estado, a partir del cual, un incremento de la proporción de agua, representa aumento de volumen. Cuando una muestra de terreno se deseca, disminuye de volumen hasta llegar a un cierto instante, a partir del cual éste permanece prácticamente constante. El límite de retracción se define como la proporción de agua que el terreno contiene, cuando alcanza su volumen mínimo.

La determinación de la retracción o disminución de volumen de un terreno puede dar una idea de su resistencia; un terreno coherente será

más compresible cuanto mayor sea su contenido de agua y, por tanto, su retracción.

La determinación de la retracción de un terreno se puede hacer tomando directamente una muestra de éste, cuyo volumen se determina, bien por medición directa, si la muestra tiene forma geométrica, o bien rellenando la excavación con arena, según antes dijimos; la muestra se deseca, primero, en el aire, y luego, en la estufa, a 125° C., hasta peso constante, y se determina su volumen. La retracción será:

$$R = \frac{\text{Volumen inicial} - \text{Volumen final}}{\text{Volumen inicial}} \times 100.$$

Aproximadamente, según el profesor CARLO CASTELLI GUIDI, los terrenos podrán clasificarse según el valor de R :

- Buenos..... R menor del 5 %.
- Discretos..... R comprendido entre el 5 % y el 10 %.
- Regular..... R comprendido entre el 10 % y el 15 %.
- Malo..... R mayor del 15 %.

El estado de consistencia de un terreno puede representarse por el “índice de consistencia”

$$K = \frac{\text{límite líquido} - \text{contenido de agua en estado natural}}{\text{índice de plasticidad}}$$

Según el “índice de consistencia”, GUIDI clasifica los terrenos en:

FLÚIDO	Fluido plástico	muy plástico	Plástico	Sólido plástico	Semisólido	Sólido
Índice de consistencia $K =$	0	0,25	0,50	0,75	1	
	↓				↓	↓
	Límite líquido			Límite de plasticidad		Límite de retracción

Para un contenido de agua superior al estado muy plástico, existe el peligro de corrimiento.

175. Capacidad de duración. — Este ensayo consiste en someter una muestra del terreno a ensayar a la acción alternativa de humedad

y sequedad, o de hielo y deshielo. Se preparan las muestras del terreno a ensayar en el molde Proctor, donde se apisonan debidamente, con la cantidad óptima de agua; una vez hecho esto se someten: 1.º A la acción alternativa de humedad y sequedad, sumergiendo la probeta en agua durante dieciséis horas y secándola luego en una estufa durante ocho horas; y 2.º Las mismas muestras se someten a la acción alternativa de hielo y deshielo, sumergiéndolas en agua durante ocho horas, sometiéndolas a la acción de una helada durante dieciséis horas, teniéndolas después en aire durante ocho horas y secándolas luego en una estufa durante quince horas. Los ciclos se repiten hasta doce veces, pesando las probetas y determinando la pérdida en peso sufrida después de cada ciclo. El ensayo indicará el comportamiento del terraplén ante la acción de los agentes atmosféricos.

176. Clases de terrenos preferibles para la formación de terraplenes. — Para la construcción de terraplenes será preferible la utilización de tierras, especialmente en sus capas superiores, que no estén sujetas a grandes cambios de volumen; deben tener, por tanto, una retracción lo más pequeña posible. Dentro de un terreno determinado, se deberá procurar que la cantidad de agua que el terraplén contenga, o pueda contener, se aproxime a la proporción óptima determinada en el Laboratorio; nunca deberán utilizarse terrenos en los cuales la cantidad de agua sea superior a la correspondiente a su límite plástico. Veamos cuáles son las distintas clases de terrenos que corrientemente se encuentran y cuáles son sus propiedades desde el punto de vista que estamos estudiando.

177. Roca. — La roca es el material ideal, especialmente cuando es preciso utilizar rápidamente la explanación, sin temor a asentos. El terraplén, no obstante, se ha de construir cuidadosamente, colocando las piedras con el fin de rellenar los huecos que quedan entre las de gran tamaño, con otras menores. Cuando hay planteados problemas de drenaje del firme, la roca resulta especialmente recomendable para los rellenos.

178. Suelos granulares. — Grava y arena, puras o mezcladas con ciertas proporciones de arcilla o tierra vegetal, son materiales excelentes para la formación de rellenos, que asientan muy poco y son muy buen cimiento para firmes definitivos, elásticos o rígidos; no deslizan, ni se erosionan fácilmente. Tienen un peso en seco elevado, de 1.900 a 2.100 Kg. por m.³; límite líquido y plástico bajos.

179. Aluviones compuestos de arena fina y materia orgánica.

Terrenos de una densidad, secos, de 1.800 a 1.900 Kg. por m.³. Tienen una gran capacidad de absorción de agua; contienen, generalmente, una pequeña cantidad de arcilla, que actúa como aglomerante, sin que represente un peligro de expansión bajo la acción del agua capilar. Generalmente estables, pero fácilmente erosionables, si no están debidamente protegidos. Cuando no están bien consolidados, los terraplenes que forman, son inestables; tienen peligro de corrimientos, erosión y alteración, por la acción de las heladas.

180. Arcilla.— La arcilla, silicato de alúmina hidratado, es un material de una elasticidad y plasticidad muy variable, según el grado de

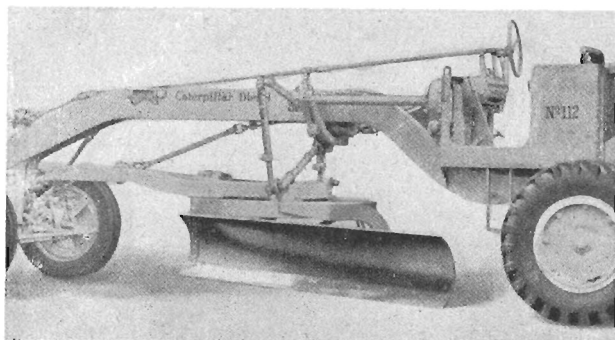


Figura 166.

humedad que contiene; prácticamente indeformable, cuando está seca, y eminentemente plástica con un grado determinado de humedad. Tiene una gran retracción; su cohesión es muy variable, casi nula con gran cantidad de agua, y pequeña, cuando está seca; grande, cuando tiene una determinada proporción; es, por tanto, un material muy variable, con las condiciones de humedad en que se encuentra y, por tanto, peligroso. La arcilla, toda ella, es mala para su uso en los terraplenes; únicamente la arcilla no expansiva, cuando la cota es pequeña y el terraplén no está sujeto a las alternativas de humedad y sequedad, puede tolerarse, extremando el cuidado en la consolidación; nunca se empleará cuando el terreno sobre el que haya de cimentarse presente planos de deslizamiento, pues la arcilla, eventualmente húmeda, actuando como un lubricante en la superficie de unión, podrá hacer que todo el terraplén se corra.

La arcilla expansiva no debe emplearse nunca; cuando excepcional-

les condiciones locales obliguen a ello, deberá extremarse el cuidado en la ejecución, especialmente por cuanto al drenaje se refiere. Las arcillas expansivas, cuyo hinchamiento en presencia del agua alcanza proporciones grandes, peligrosas para la buena conservación de los firmes que sobre ella insisten, son las arcillas de estructura laminar y grado de finura elevado; la prueba de retracción de volumen dará un indicio sencillo de la naturaleza de la arcilla en este aspecto.

181. Maquinaria especial para la nivelación de tierras y consolidación de terraplenes. — Cuando la obra tiene importancia por su



Figura 167.

volumen y, además, es preciso abrir el camino rápidamente al tránsito, se emplean para la nivelación de las tierras y su consolidación, maquinaria especial, que consiste en: *a)* Niveladoras; *b)* Aparatos de consolidación.

a) Las máquinas niveladoras consisten en una gran hoja metálica, de forma curva, como puede verse en las figuras 166, 167 y 168; va montada bajo un chasis, que se mueve por un tractor; unos juegos de palancas permiten girar la hoja niveladora alrededor de ejes horizontales y verticales, y subirla o bajarla, en la medida que el conductor desee; se logra así que la hoja, arrastrada o empujada por el tractor, nivele la tierra de la explanación, actuando como maestra, pues inclinando la hoja niveladora con relación al sentido de la marcha, la tierra sobrante

se va echando fuera de la zona de trabajo, y queda la superficie nivelada.

b) Aparatos especiales de consolidación: Los rodillos normales, de los cuales se hablará más adelante, al tratar de la construcción de firmes, realizan la consolidación de terraplenes, empezando por la capa superior, y dejan las inferiores imperfectamente asentadas; para salvar estos inconvenientes, se emplean, desde hace bastantes años, los cilindros llamados de pata de cabra (fig. 169, c); los salientes penetran

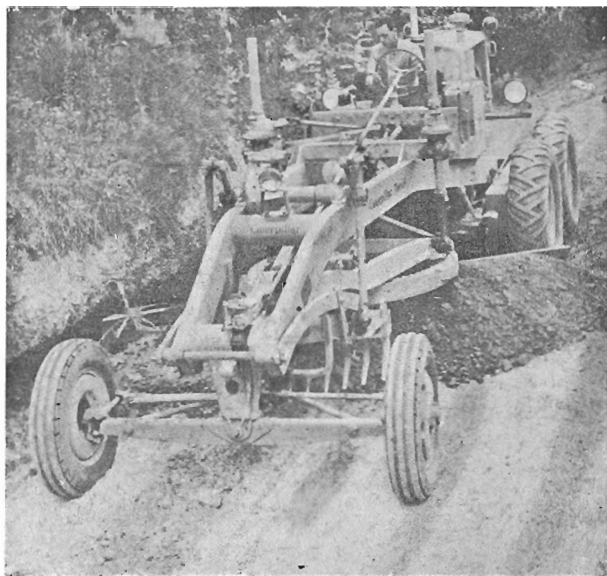
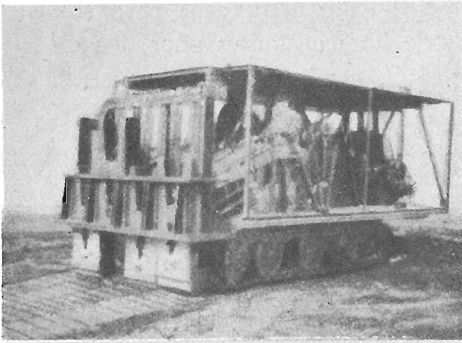


Figura 168.

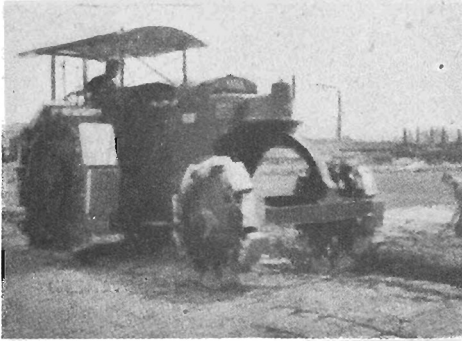
hasta el fondo de la capa a consolidar; se ejecuta así el apisonado de abajo hacia arriba, logrando una eficacia muy superior a los cilindros ordinarios.

En las autoestradas alemanas, la necesidad de establecer rápidamente firmes rígidos definitivos, en condiciones de seguridad, obligaba a una pronta y total consolidación de los terraplenes; para ello, se han utilizado diferentes tipos de aparatos especiales, que pueden verse en las figuras 169 y 170. En todos ellos se tiende a evitar el apisonado superficial, sin haber conseguido la debida consolidación de las capas inferiores; para ello, en los aparatos (a) y (b) se hace desigual la superficie del rodillo, fundándose en el mismo principio del cilindro de pata de cabra (c); en los (d) (fig. 170), se sustituye la acción del apisonado conti-

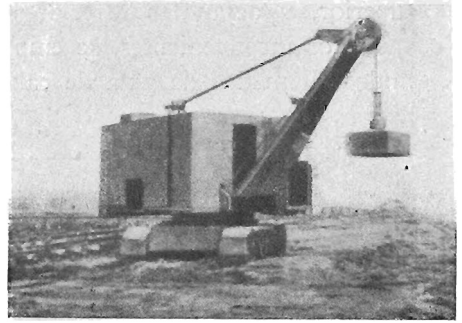
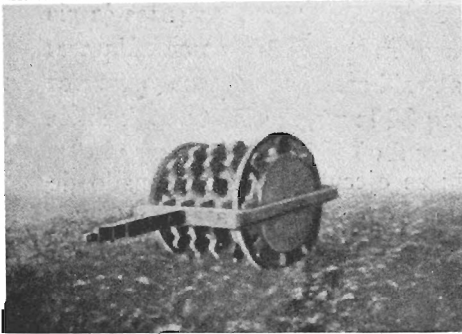
(a)



(b)



(c)



(d)



(e) – Vibrador.

Figura 169.

nuo por golpes; el tipo (e) consiste en un aparato vibrador, de excelente resultado. Los del tipo conocido con el nombre de "Rana" (fig. 170), se emplean mucho; se construyen de 500, 1.000 y 2.500 kilogramos; su rendimiento y consumo es el siguiente:

	TIPOS DE RANA		Observaciones
	500 Kg.	1.000 Kg.	
Altura máxima de la tierra a apisonar.....	60 a 80 cm.	80 a 100 cm.	Terreno ligero.
	40 a 50 cm.	50 a 70 cm.	Arcilla.
Superficie apisonada en una pasada por hora...	180 m. ²	250 m. ²	Terreno ligero.
	160 m. ²	220 m. ²	Arcilla.
Superficie apisonada en dos pasadas por hora.	100 m. ²	150 m. ²	Terreno ligero.
	80 m. ²	100 m. ²	Arcilla.
Peso total del aparato...	550 kg.	1.170 kg.	
Consumo de benzol en 8 horas.....	16 a 24 l.	30 a 40 l.	
Idem de aceite en ídem.	0,2 l.	0,5 l.	
Idem de petróleo en ídem	0,5 l.	0,5 l.	



Atentamente proporcionado por "Demag".
Fig. 170. — Consolidador tipo "Rana".

Como complementarios de los procedimientos anteriores, pueden usarse los rodillos corrientes, a ser posible *tándem*, y de unas diez toneladas de peso.

182. Causas corrientes de destrucción o averías en los terraplenes. — Erosión: Es causa de destrucciones parciales o totales. Se produce la erosión en tierras atacables por los agentes atmosféricos, no protegidas contra la acción de la lluvia, las heladas o las inundaciones; la erosión puede ser debida también a una defectuosa construcción.

Asiento de terraplenes: La imperfecta consolidación, debida a la falta de apisonado del terraplén, o al apisonado de un terraplén, con falta de agua o con agua en exceso, es causa de asiento. Los terraplenes que sufren asiento tienen peso mucho menor que el determinado experimentalmente; la cantidad de agua o de huecos es excesiva, y se producen posteriores consolidaciones.

Corrimiento de terraplenes: Los corrimientos de terraplenes son debidos a la existencia de juntas de deslizamiento, bien en la masa misma, o bien en la unión del terraplén con el cimientó; son especialmente peligrosas, a estos efectos, las arcillas como cimientó del terraplén, pues si eventualmente llega a ellas el agua, actúa en la superficie de unión como un verdadero lubricante, que es causa del corrimiento; la corrección de este defecto se logra por un eficaz drenaje del plano de deslizamiento y la rotura de su continuidad.

Puede haber corrimiento del terraplén, por insuficiente resistencia al esfuerzo cortante de su masa; esto ocurre cuando los taludes del terraplén son reducidos para la altura y naturaleza del material que lo forma, o cuando la consolidación del material es pequeña. En la consolidación, se debe llegar al 90 por 100 del peso determinado en el Laboratorio para la humedad óptima; el talud debe ser el apropiado; cuando se trata de terrenos granulares, sin cohesión, la altura del terraplén es indiferente, pues los materiales toman un cierto ángulo de talud natural, independientemente de la cota del terraplén; en cambio, cuando se trata de terraplenes formados por material de una cierta cohesión, el talud deberá ser menor, a medida que la cota aumenta.

Pueden también correrse los terraplenes por pérdida de la estabilidad, bien del cuerpo del terraplén, o bien del cimientó, por saturación de su masa. Los grandes terraplenes, por producir fuertes cargas sobre el cimientó, lo alteran y consolidan, cuando es compresible, pudiendo llegar a cerrar los canales naturales de drenaje; por esta causa, se puede producir una elevación de la capa freática, con un crecimiento de la presión hidrostática, que contribuirá, aumentando las fuerzas horizon-

tales, al corrimiento del terraplén. Un buen drenaje es el remedio contra este peligro.

Por último, una carga excesiva sobre el cimientto, cuando éste es plástico, puede ser causa de su movimiento y deformación, que al transmitirse al terraplén, y alterar sus condiciones de estabilidad produzca, incluso, su ruina.

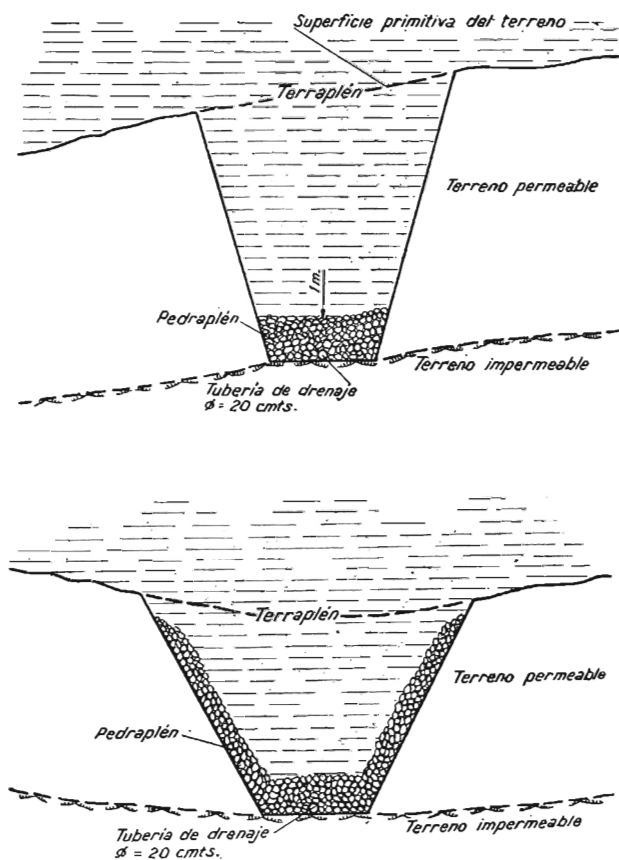


Figura 171.

183. Drenaje de terraplenes. — De gran número de los accidentes enumerados hemos visto es causa el agua, que, en una u otra forma, llega al cuerpo del terraplén, o su cimientto; para evitar que esto suceda, se emplean los drenes; el dren — camino fácil para dar salida al agua, causa del trastorno — es una zanja rellena, en toda o en parte de su profundidad, de material muy permeable, que la intercepta, recoge y elimina, en conducciones impermeables; estas conducciones pueden ser tubos per-

forados, con juntas abiertas, o bien canales de fábrica — corrientemente hormigón —, cubiertos por losas, con juntas abiertas que permiten la filtración del agua; los conductos colectores deben ir rodeados de piedra partida o grava, de tamaño suficiente para que no exista peligro de

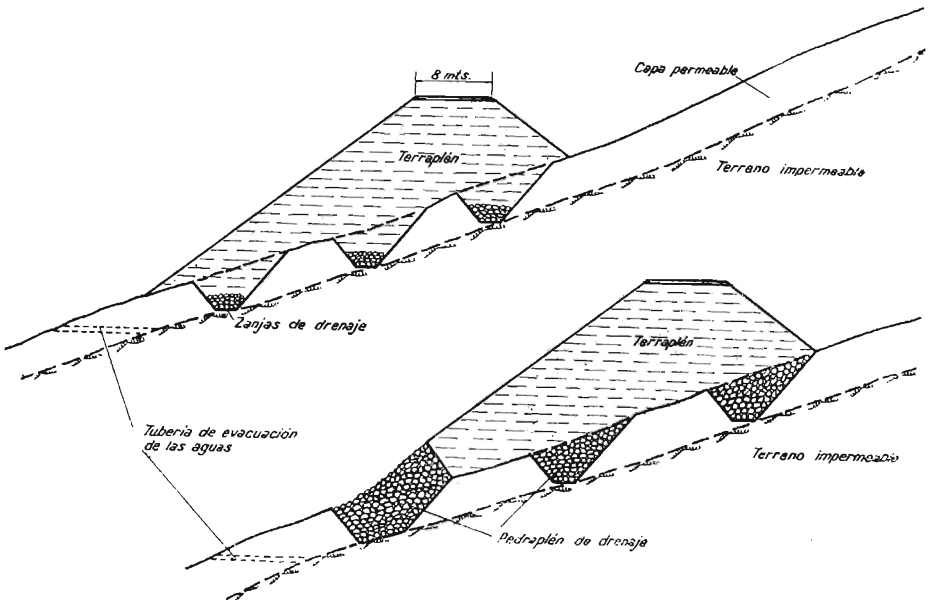


Figura 172.

que se rellenen sus huecos; las primeras capas, alrededor del dren, deben colocarse con todo cuidado, para asegurar la máxima permeabilidad.

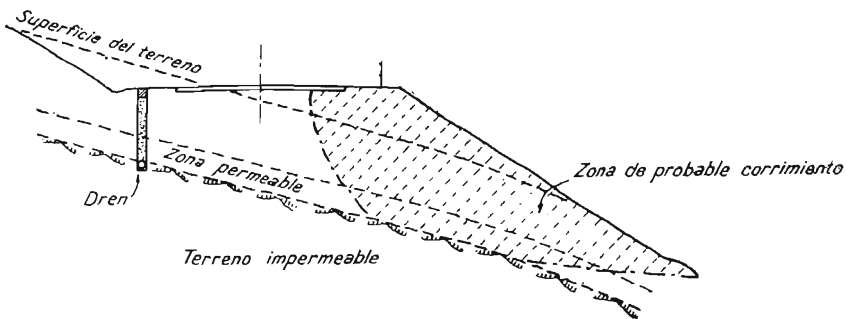


Figura 173.

En la figura 171 puede verse un tipo de zanja de drenaje para el saneamiento de un terraplén, y en la 172, la forma eficaz en que debe disponerse el drenaje en relación con la sección transversal del camino.

Cuando se trata de prevenir el corrimiento de un terraplén asentado sobre una base impermeable (fig. 173), que por causa del agua pudiera correrse en la zona rayada, el dren se establece en la parte alta, como en la figura se indica.

Frecuentemente, se presenta el caso que puede verse en la figura 174: un camino, situado a media ladera, tiene el peligro de ser inter-

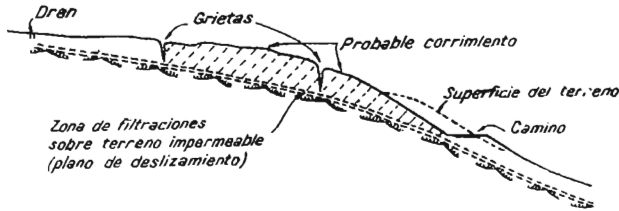


Figura 174.

ceptado por los corrimientos de la ladera superior, que, por su naturaleza — por ejemplo: arcilla o roca estratificada con buzamiento en dirección del camino —, puede deslizarse, si el agua llega a la superficie de unión del terreno con la capa impermeable de asiento; un dren colocado donde indica la figura, saneará la zona peligrosa.

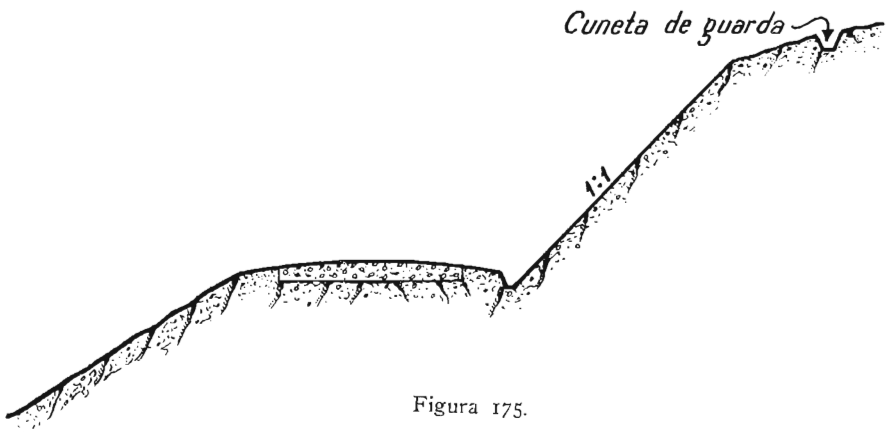


Figura 175.

184. Defensa de los desmontes o terraplenes contra la erosión.

Cuando un desmonte o terraplén está construido en terreno erosionable, la defensa del talud puede hacerse, bien evitando que el agua — causa de la erosión — pase por el talud, o bien protegiendo su superficie para evitar la acción destructiva de los agentes atmosféricos. El agua

de los terrenos inmediatos al desmante, se evita vaya a los taludes por medio de las cunetas de guarda (fig. 175), que la recogen y desvían antes de que pueda llegar a ellos. Cuando éstos son de gran altura, para evitar que el agua de lluvia los erosione, se pueden construir banquetas cada tres o cuatro metros (fig. 176), de un ancho de 0,80 a 1 m., con pendiente transversal en dirección contraria al talud y con una longitudinal para que actúen como colectores del agua que a ellas llega; si la trinchera es muy larga, de cuando en cuando, se disponen desagües que pueden ir a la cuneta general del camino.

Los taludes de desmontes o terraplenes, se defienden eficazmente de la erosión superficial, realizando en ellos plantaciones adecuadas; la

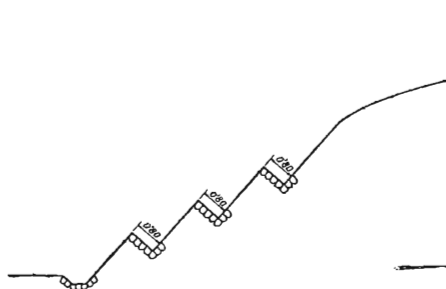


Figura 176.

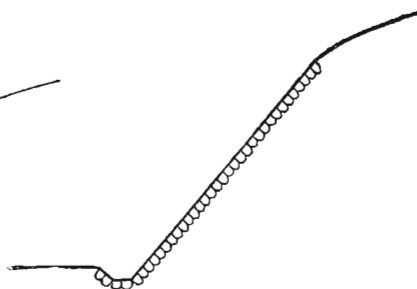


Figura 177.

planta, para que sea eficaz, debe ser de raíces numerosas y pequeñas; en muchos casos, la plantación puede constituir un motivo de decoración agradable.

En algunos casos, pueden usarse revestimientos de piedra en seco (figura 177).

185. Obras accesorias. Tajeas. Muros de sostenimiento. — La explanación exige, como obras accesorias de importancia, para su conservación, la construcción de tajeas, que sirven para dar paso bajo ella a las aguas que, continua o accidentalmente, puedan venir por las vaguadas que el camino atraviesa; aunque se trate de vaguadas que la mayoría del año estén secas, es imprescindible existan tajeas en todos los puntos donde crucen el camino, pues, de lo contrario, el agua que eventualmente pudiesen llevar en tiempo de lluvia, produciría la erosión del pie de los terraplenes, o se acumularía al llegar a ellos, dando lugar a una saturación de su masa, muy perjudicial para la buena conservación del camino; en algunos casos podría incluso inundar la explanación. Hay

que alejar el agua rápidamente de la zona del camino, si se quiere que éste se conserve en condiciones aceptables; todo gasto que para ello se realice, se verá sobradamente compensado en economía de la conservación. Según la importancia de la vaguada que se atraviesa, así serán las características de la obra a proyectar; una idea de la superficie de su cuenca y el conocimiento de los datos pluviométricos de la zona, permitirá calcular el desagüe preciso. Su tamaño puede variar, desde un simple tubo a pontones de luces de relativa consideración.

Cuando la rasante de un camino atraviesa a nivel una vaguada, es imprescindible elevarla, para que pueda desaguar por debajo de la calzada; los badenes (cruces del agua de una vaguada a nivel con el camino) deben evitarse en absoluto; son incompatibles con la seguridad del tráfico, y su supresión, en general, no tiene importancia económica.

Los muros de sostenimiento se emplean, según ya hemos dicho, para reducir los volúmenes de desmonte o terraplén; su utilización en una zona determinada y sus características son simplemente una cuestión económica; su cálculo y detalles de construcción no es objeto de nuestro estudio. Solamente hemos de señalar la necesidad de tener un sentido estético al proyectar estas obras, especialmente en caminos de importancia.

186. Grandes obras de fábrica. — No corresponde a nuestro estudio el detenernos en el de las grandes obras de fábrica. Su importancia económica en el coste total del proyecto de un camino, puede ser muy grande y, por ello, el ingeniero debe llevar conjuntamente el estudio del trazado con el de las grandes obras de fábrica necesarias, teniendo en cuenta que, ni el trazado puede obligar a determinadas características de éstas, ni la obra de fábrica debe forzar a un trazado determinado; hay que considerar como un todo indivisible, el trazado con sus grandes obras, buscando, en el conjunto, la solución más acertada. Y en este estudio no debe perderse de vista que, en las exigencias de orden estético del trazado, la gran obra de fábrica es uno de los factores fundamentales, y que, por tanto, con el mayor cariño las ha de tener en cuenta el ingeniero al estudiar el proyecto.