

CAPÍTULO XIII

Construcción de túneles.

Operación previa a la construcción de un túnel, es su replanteo en el terreno; tiene dos fases: el replanteo externo y el interno del eje de la galería.

Es preciso marcar el eje del túnel sobre el terreno, para conocer exactamente cuál ha de ser su recorrido y poder situar, cuando los hubiere, los pozos de ventilación o ataque. En túneles importantes, que han de atravesar macizos montañosos accidentados, no es posible ver, desde un mismo punto, las dos bocas de entrada; habrá que replantarlas exactamente y será preciso medir con toda rigurosidad la longitud de la obra a realizar, marcando la orientación de las alineaciones de partida del eje de la misma. Todo ello requiere operaciones topográficas de triangulación, que permitan, con una absoluta seguridad, partir, en el replanteo del interior del túnel, de alineaciones exactas. Hay que tener en cuenta que la rapidez de los trabajos exige, la mayoría de las veces, el ataque por las dos bocas, y, en ciertos casos, por pozos intermedios; un error en las alineaciones de partida puede ser causa de graves trastornos. Las operaciones, en su concepción, son elementales; pero exigen la máxima precisión topográfica para llegar a la unión de las alineaciones, con errores tan reducidos como los logrados en San Gotardo y el Simplón.

La elección de la base o bases de partida y su medición, así como la cuidadosa determinación de los distintos triángulos, ha de hacerse por personal especializado que, por su práctica, asegure en todas las operaciones, la exactitud precisa. En la figura 216 puede verse un croquis de la triangulación del túnel del Somport, en los Pirineos, y en la figura 217, la triangulación para el trazado del eje del Gotardo.

Cuando el terreno es roca, los vértices de los distintos triángulos, se fijan marcando sobre ella, con el puntero, una cruz; para destacarla con más facilidad, se deberá hacer resaltar con un círculo de pintura de color. Cuando el terreno no sea roca o ésta no sea consistente, deberán fijarse los vértices con dados de hormigón o fábrica. Tanto en un caso

Croquis de la triangulación
para el Túnel de Somport.

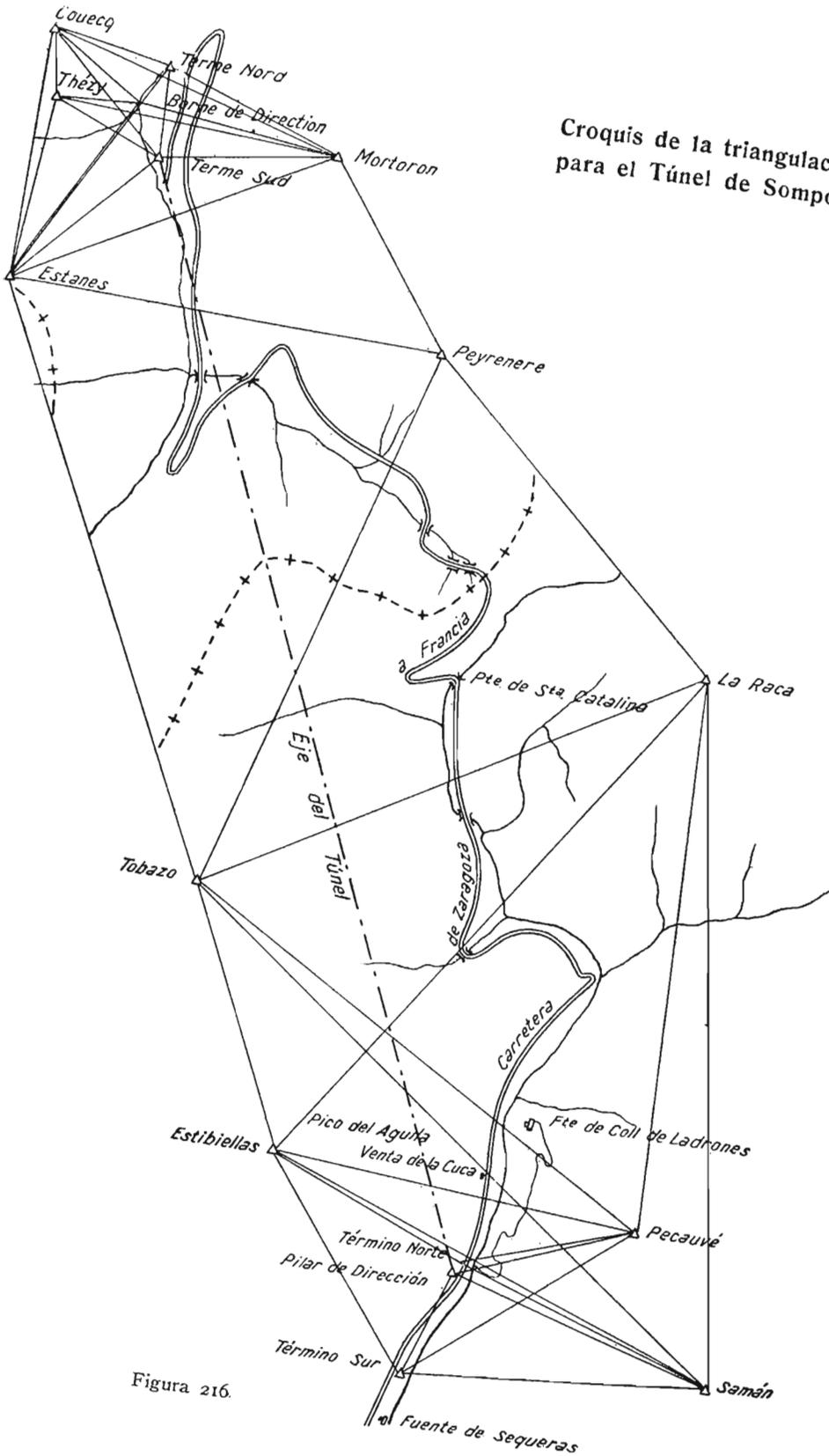


Figura 216.

como en otro, se procurará poner referencias o señales en el campo, que permitan identificar fácilmente la posición de los vértices en todo momento, y, especialmente, cuando estén cubiertos de nieve.

El problema se complica cuando se trata de replantear túneles en curva; pero la complicación en el replanteo no debe nunca ser obstáculo para que el trazado se desvíe de la alineación recta, cuando sea recomen-

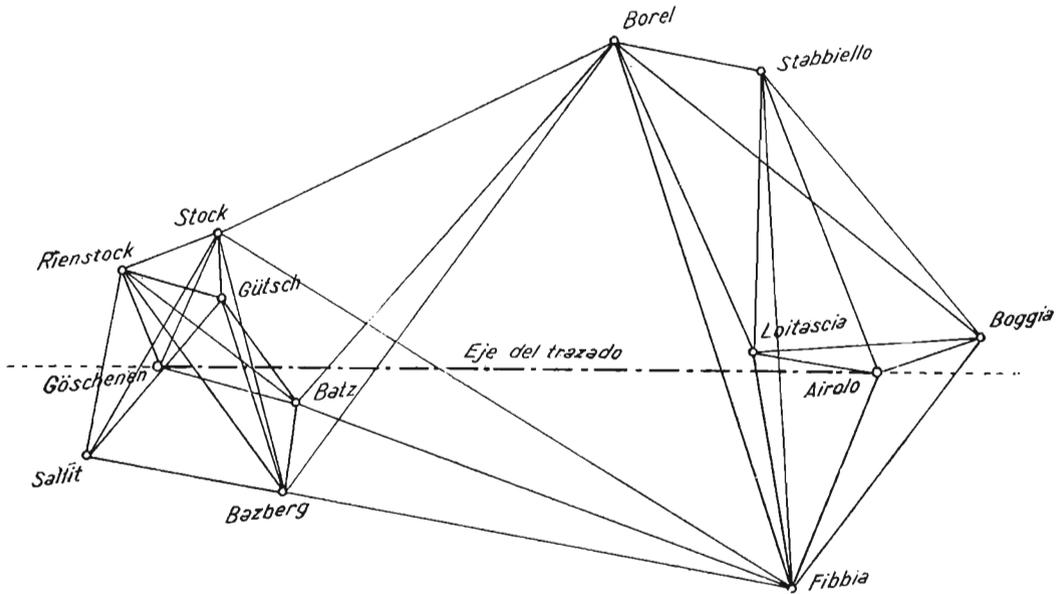


Fig. 217. — Triangulación para el trazado del eje del Gotardo.

dable por exigencias geológicas, de construcción o de trazado; hay que tener en cuenta que salvar una zona peligrosa de terreno, puede evitar gastos grandes de construcción y reducir el riesgo de accidentes de los obreros empleados en el trabajo. El problema de replanteo es siempre sencillo técnicamente, y los gastos de su ejecución esmerada, insignificantes, frente a los que representan una dificultad en la construcción.

Una vez fijadas por triangulación las alineaciones primera y última del túnel, se establecen, con toda exactitud, dos puntos de ellas; uno, fuera de la boca, a la máxima distancia que sea posible, teniendo en cuenta el alcance óptico del aparato, y otro, atrás, a una distancia que permita una buena visibilidad con antejo. Una vez hecho esto, hay que elegir la estación en la cual se ha de situar el aparato, que servirá para iniciar el replanteo del interior del túnel. El punto de esta-

ción habrá que escogerlo en forma tal que desde él se domine la mayor longitud del interior del túnel y, además, no sea un obstáculo para la ejecución de la obra; en la práctica, este punto se fija a unos 12 a 15 metros de la boca de entrada del túnel; una vez realizada la trinchera de acceso, se colocará un mojón en el punto elegido para estación; cuando se trate de un túnel de gran longitud, se construirá, encima del mojón, una pequeña caseta que pueda alojar el aparato, que queda permanentemente montado; la caseta deberá tener ventanas en ambas direcciones, mirando a delante y atrás, en la alineación del túnel.

Cuando existen puntos de ataque intermedios, se fijará la posición de los pozos con todo cuidado, refiriéndolos, por lo menos, a cuatro puntos fijos, de los cuales, dos, deberán estar situados en el replanteo exterior del eje de la galería.

212. Replanteo del eje interior del túnel.

La técnica del replanteo del eje del túnel, es, en principio, idéntica al replanteo del eje de un camino a cielo abierto. El trabajo presenta, no obstante, dificultades propias, por desarrollarse dentro de la excavación, sin luz y con un espacio reducido.

Los jalones se sustituyen por hilos de plomo, que llevan suspendida una lámpara de aceite (figura 218); las miras deben ir iluminadas convenientemente para que sean posibles las lecturas, y lo mismo debe suceder con los aparatos, que pueden llevar pequeñas lámparas eléctricas; las distancias se miden con cinta metálica y, en trabajos de precisión, con hilo de acero de níquel (acero Inwar), que tiene un reducidísimo coeficiente de dilatación.

En la sección del túnel ya excavada, deben quedar colocados en la bóveda, y cada 15 ó 20 metros, grapas de hierro, de las cuales vayan colgados los hilos de plomo, con su lámpara; para el replanteo aproximado de la galería de avance, en el frente de ataque, un obrero fija la dirección con una lámpara alineada con las dos anteriores, y con el humo mismo de ella, marca en la roca, una vertical en el plano de los dos últimos hilos de replanteo.

Para la rectificación del replanteo de dirección, es preciso dejar exactamente fijos los puntos del eje; cuando el túnel sea en roca y no haya peligro de que se muevan las grapas de las cuales cuelgan los hilos de

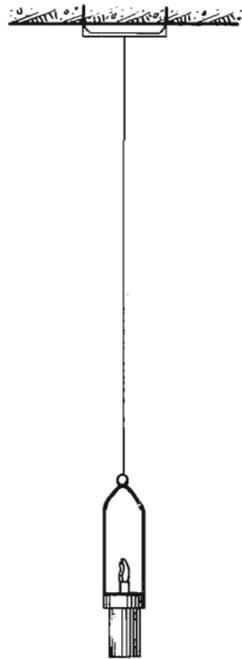


Figura 218.

dirección, sobre ellas pueden marcarse los puntos exactos del replanteo; cuando el túnel esté construído en terreno movedizo, los puntos se fijan en dados de hormigón, empotrados en el fondo de la excavación, en los cuales se determinan por intersección de dos líneas; para la fijación de los puntos, puede emplearse la disposición que se detalla en la figura 219; sobre un bastidor de madera, colocado sobre el punto que se ha de marcar, va una lámpara de dirección, que puede correr sobre

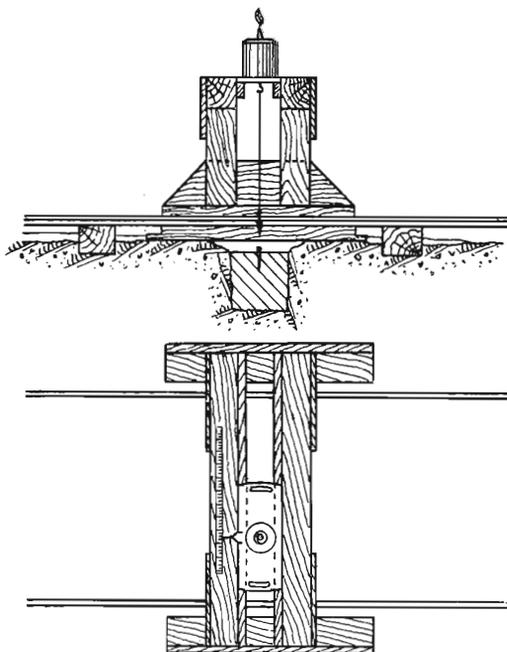


Figura 219.

un sencillo dispositivo; la lámpara lleva suspendida una plomada exactamente debajo de ella, que, una vez alineada, servirá para fijar el punto sobre un dado, previamente empotrado en el terreno; para distancias inferiores a 150 metros, la alineación se hace con diafragmas, que van colocados en la lámpara (fig. 220); para distancias superiores, se alinea directamente con la llama. El replanteo es necesario comprobarlo cada cuatro o seis meses, pues los movimientos del terreno pueden producir desviaciones de los puntos fijados, y, como se ha de partir de ellos para continuar el replanteo, resultan, en definitiva, errores inadmisibles.

Quando el trazado del eje del túnel se desarrolla en curva, el replanteo generalmente habrá que hacerlo por tangentes sucesivas, o bien

por el método de la cuerda prolongada, de que hablamos al tratar de replanteo de curvas circulares (epígrafes 108 y 109).

Ambos sistemas tienen, según dijimos, el inconveniente de que los errores se van acumulando y, por tanto, habrá que extremar las precauciones, repitiendo las operaciones, para mayor seguridad.

A pesar de las dificultades que siempre presenta el replanteo de un túnel, los errores que se han encontrado en los principales construídos, han sido insignificantes, como puede verse en la tabla siguiente:

Túnel.	Longitud.	Error de dirección en el encuentro de la galería de avance.	Error de nivel en el encuentro de la galería de avance.	Error en la longitud.	Observaciones.
	— Metros.	— Centímetros.	— Centímetros.	— Centímetros.	
Gotardo	14.900	30	—	—	Con alineaciones curvas y rectas.
Simplón	19.756	20,2	8,7	79,0	
Loetschberg ...	14.536	25,7	10,2	41,0	

213. Principales problemas de construcción. — La construcción de un túnel es problema principalmente de excavación; como secundario, existe el del revestimiento de la sección. La excavación en túnel presenta dos características especiales, que son las que influyen principalmente en el precio de coste del metro cúbico de terreno excavado.

a) La obra se desarrolla en un espacio reducido, donde es preciso hacer compatible la excavación, propiamente dicha, con la carga y transporte de los escombros; el tiempo perdido y por tanto, el coste del metro cúbico, es mucho mayor que en la excavación a cielo abierto.

b) No siendo en secciones pequeñas y terrenos excepcionalmente resistentes, es preciso adoptar un sistema de excavación *por partes*, que permita evitar el derrumbamiento del terreno excavado, y reducir a un mínimo el coste de la entibación precisa para sostenerlo, mientras se construye el revestimiento; el sistema de entibación es más complicado y costoso a medida que el terreno es menos consistente y, por tanto, los empujes producidos por la excavación son mayores. En túneles excepcionalmente malos, debajo del agua, hay que recurrir a métodos especiales de ejecución, que encarecen mucho el coste de la obra.

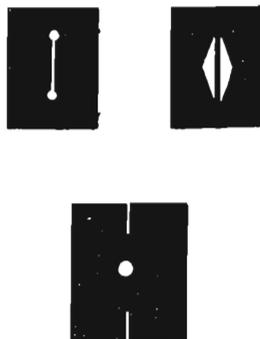


Figura 220.

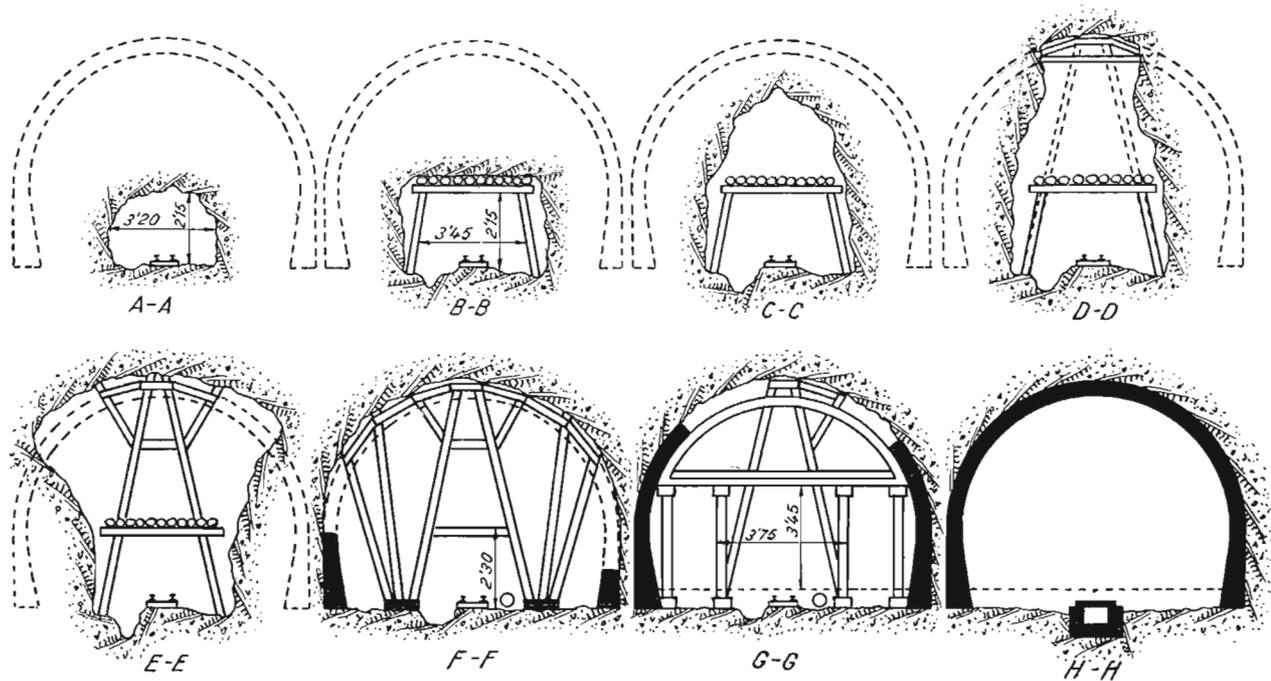


Fig. 221, a. — Túnel de Loetschberg. Perfiles transversales.

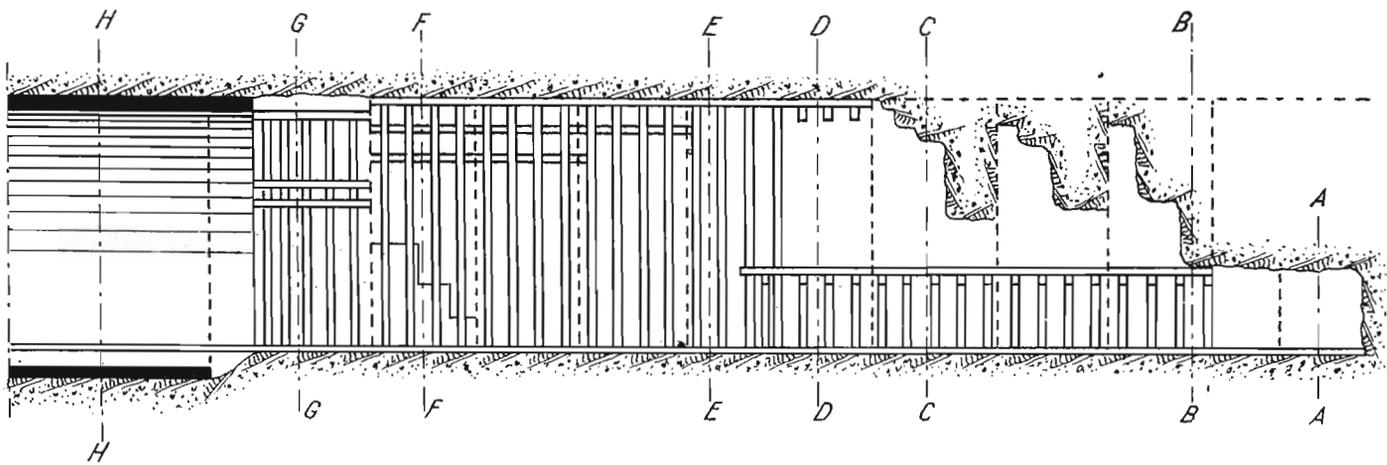


Fig. 221, b. — Túnel de Loetschberg. Perfil longitudinal.

214. Sistema de excavación. — Existe una diferencia fundamental entre los sistemas de excavación en terrenos consistentes y los de pequeña coherencia, que originan empujes de importancia.

215. Terrenos consistentes. — La excavación de un túnel en terreno consistente, que se sostiene sin entibación o con una entibación ligera, se realiza efectuando primero una pequeña galería, denominada galería de avance, que se ensancha hasta alcanzar la sección total del túnel; el ensanche de la galería de avance se denomina “destroza”. La galería de avance, puede realizarse en la parte alta de la sección o bien en la parte baja; sus dimensiones deben ser las estrictamente precisas para que un hombre pueda trabajar; 2,5/3,5 metros de ancho por 2 a 3 metros de alto. La galería de avance va adelantada, en relación a la excavación de la sección total, unos 15 a 20 metros. Cuando la sección del túnel tiene grandes dimensiones, como, por ejemplo, en el túnel de Loetschberg, el ensanchamiento de la destroza se efectúa por etapas sucesivas (figura 221). En las figuras 222 y 223 pueden verse dos esquemas de la forma de llevar la excavación en ambos casos.

Para elegir un sistema de excavación se debe considerar: *a)* la rapidez del descombro y carga de los productos de la excavación; *b)* posibilidad de la rápida evacuación de los productos de la excavación; a este fin ha de tenerse en cuenta, que la entibación que se proyecte, no estorbe la colocación de las vías y el movimiento, en ellas, de las vagonetas encargadas del transporte; *c)* que el revestimiento de la excavación puede realizarse con la mayor rapidez y facilidad. La forma de llevar los trabajos del túnel de Loetschberg es, a estos efectos, muy acertada.

216. Entibación. — Normalmente, es preciso entibar la excavación. Solamente en casos de roca resistente, podrá suprimirse, procurando que el revestimiento vaya inmediatamente seguido de la excavación.

La forma de entibar los túneles debe estar inspirada en los siguientes principios, con objeto de lograr la máxima economía en el volumen del material empleado, mano de obra y rapidez en las operaciones de montaje y desmontaje: *a)* todos los elementos de la estructura deben trabajar a compresión, evitando disposiciones que produzcan flexiones; *b)* la longitud de los distintos elementos debe reducirse con puntales, para evitar la flexión; *c)* las juntas de unión de los distintos elementos deben ser sencillas, para evitar gastos inútiles en su ejecución y en la mano de obra de montaje y desmontaje; *d)* la disposición general de la estructura debe permitir la fácil extracción de los escombros y ejecución de la fábrica del revestimiento; *e)* se deberá disponer la entibación de ma-

nera que pueda ser fácilmente reforzada, sin modificar la disposición general; debe preverse, al proyectarla, dónde y cómo ha de ser colocada la madera de refuerzo, si fuera precisa, con objeto de que no estorbe el trabajo; *f*) ha de ser posible cambiar los distintos elementos de la entibación, si fuese necesario, produciendo el menor trastorno en el conjunto; *g*) con objeto de que la madera de la entibación no sea sometida a trabajo excesivo, se debe llevar la obra de revestimiento lo más cerca posible de la excavación; se obtendrá, de este modo, no solamente una economía en el volumen total de madera a emplear, sino también en sus dimensiones.

El material corrientemente usado es la madera. Como las cargas a que la entibación está sometida alcanzan, a veces, valores enormes,

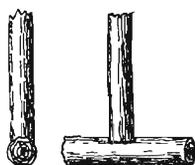


Fig. 224. — Apoyo plano.

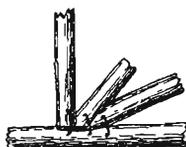


Fig. 225. — Apoyo en ángulo.

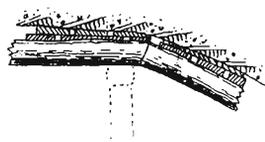


Fig. 226. — Junta plana.

200 toneladas por metro cuadrado y aun superiores, las escuadrías que es posible dar al material no pueden ser las precisas, para que los coeficientes de seguridad alcancen los valores corrientes de 3 y 4, pues entonces no quedaría, en la excavación, espacio para que los trabajos se desenvolvesen normalmente; por esta causa, hay que observar constantemente la entibación, y sustituir aquellas piezas que empiecen a averiarse antes de su rotura. Las maderas corrientemente empleadas son, el pino y el abeto.

Las características de la madera de pino son las siguientes:

Peso específico	$\left\{ \begin{array}{l} 350-600 \text{ Kg./m.}^2 \text{ madera seca.} \\ 500-1.000 \text{ " " " mojada.} \end{array} \right.$
Módulo de elasticidad	
Resistencia a tensión	750 "
Idem a compresión	245 "
Resistencia esfuerzo cortante. $\left\{ \right.$	330 " normalmente a las fibras.
	50 Kg./cm. ² paralelamente a las fibras.

Las maderas se unen unas a otras por juntas, que se refuerzan con grapas metálicas. Las uniones deben ser sencillas y resistentes; las más usadas son:

1. Apoyo plano sobre rollizo (fig. 224).

2. Apoyo de ángulo y junta (fig. 225).
3. Junta plana (fig. 226).
4. Apoyos sobre pie derecho (fig. 227).
5. Uniones en ángulo (fig. 228).
6. Junta acanalada, en la cual la extremidad de un rollizo se acanalada para unirlo a otro (fig. 229).



Fig. 227. — Apoyo sobre pie derecho.



Fig. 228. — Unión en ángulo.

Las grapas son piezas de hierro (fig. 230), que sirven para reforzar las uniones de elementos.

Cuando el terreno produzca grandes empujes, será necesario sustituir algunas piezas de madera por perfiles laminados. En arcillas que

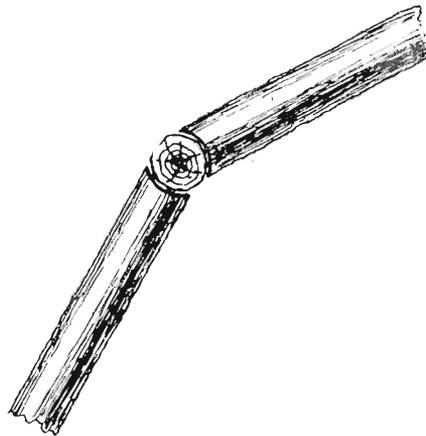


Fig. 229. — Junta acanalada.

se hinchan, dando lugar a empujes muy grandes, se puede recurrir a forrar la excavación con chapa de palastro, que evite que el terreno entre en contacto con los agentes atmosféricos.

Las cimbras para la construcción del revestimiento, pueden ser de madera o metálicas, sin que presenten particularidad alguna en relación con las necesarias para una bóveda corriente.

217. Entibación de la galería de avance. — Cuando la galería de avance se realiza en roca consistente, la entibación puede limitarse a “cabezales” apoyados en cajas expresamente realizadas en las paredes de la galería; el cabezal debe quedar exactamente encajado en ellas; en-

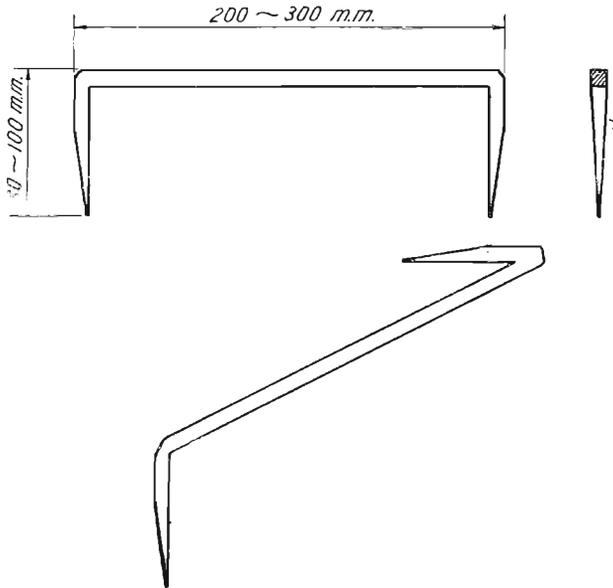


Fig. 230. — Grapas.

tra oblicuamente y luego se va forzando hasta que esté normal al eje; si hay huecos en algún sentido, se retaca el cabezal con cuñas de madera, que lo fijan (fig. 231). Cuando el coste de la madera sea más reducido que la realización de las cajas para alojar los cabezales, se pueden éstos sostener por pies derechos que, o bien se apoyen directamente sobre el terreno o sobre tablonces longitudinales; estos pies derechos se presentan inclinados, forzándolos luego hasta su posición definitiva a golpes de martillo (fig. 232).

Si se quiere que queden bien fijos, se pueden unir los pies derechos y cabezales con grapas de hierro.

Cuando el terreno produzca empujes de cierta importancia, puede resultar preciso unir los pies derechos en su base por rollizos transver-

sales (fig. 233), “estampidores”, que eviten que, por los empujes horizontales, puedan moverse sus asientos.

La distancia entre los cuadros, normalmente de 1 m. a 1,50 m., puede ser menor si la naturaleza del terreno así lo exige; los rollizos serán de diámetro variable, entre 25 y 30 cm. Cuando la cohesión del terreno

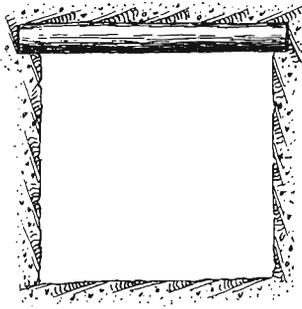


Figura 231.

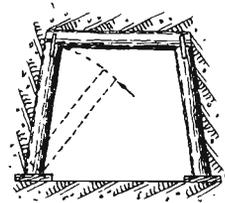


Figura 232.

es pequeña, la excavación se forra con tablas, cuyo espesor varía de 1 a 3 pulgadas (2,5 a 7,5 cm.). Cuando la presión del terreno sea muy grande, se puede recurrir a reforzar los cuadros, añadiendo unos nuevos interiormente, o bien a colocar puntales o tornapuntas. El último sistema

tiene el inconveniente de que las nuevas piezas reducen el espacio libre, ya por sí pequeño. Las tablas de forro de la entibación, cuando el terreno no es muy incoherente, se van colocando a medida que se disponen los cuadros; cuando el terreno es muy incoherente, es preciso forrar, no sólo las paredes y el techo, sino también el fondo y frente; en algunos casos, la incoherencia del terreno obliga a que el revestido de tablas, vaya por delante de la excavación; para ello, las tablas se van hincando en el terreno por delante de aquélla; se levantan las tablas del forro del frente, y las longitudinales se hincan

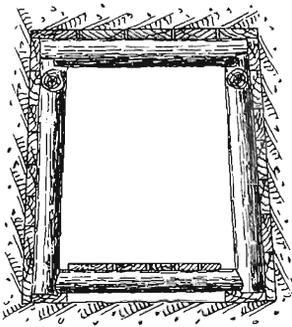


Figura 233.

a golpes de mazo en una pequeña longitud, que luego se excava en el frente en toda la sección, o bien sólo en una pequeña zona.

Las figuras 234 y 235 dan una idea clara de las disposiciones adoptadas; las tablas se fijan sobre los cuadros de apoyo, por medio de cuñas.

218. Armadura de la sección total del túnel.—La entibación de la sección total del túnel, a medida que la excavación va avanzando, se realiza en la forma que se indica en la figura 236; los mayores esfuerzos a que está sometida la sección exigen colocar tornapuntas, que serán más numerosos cuanto mayor sea la sección y peores las condiciones del terreno; la disposición *a*), la más sencilla para vía simple, se va reforzando según las disposiciones *b*) y *c*) cuando las cargas aumentan; en los esquemas *d*) y *g*) pueden verse disposiciones corrientes para túneles de doble vía. Cuando los empujes del terreno son excepcionales, se refuerza aún más la entibación, de acuerdo con las cargas a que ha de

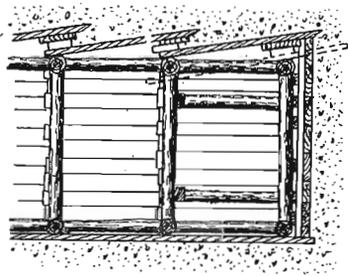


Figura 234.

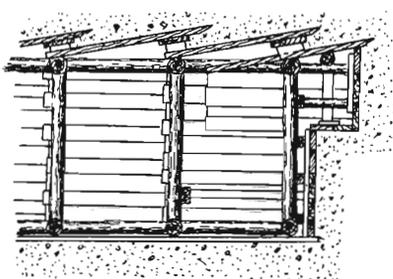


Figura 235.

estar sometida. El forrado de tabla, en el caso de terrenos de pequeña o nula cohesión, se realiza en la misma forma que en la galería de avance. Las tablas van sujetas por cuñas, que permiten soltarlas cuando es preciso para la construcción del revestimiento. En el proyecto de una entibación de este tipo hay que tener en cuenta: *a*) la existencia del suficiente espacio libre, para el fácil movimiento de los medios de transporte que han de extraer los productos de la excavación; *b*) la facilidad del montaje y desmontaje, sin trastornar la entibación restante, de la zona necesaria para la construcción del revestimiento.

Las entibaciones metálicas se han empleado algunas veces —túnel de Naensen e Ippensen, años 1862 y 1865— hasta 1880; luego, fueron desechadas y se volvieron a emplear en el año 1920. No siendo por causas excepcionales, no resultan recomendables, por su elevado coste y por la mayor complicación del montaje y desmontaje.

219. Entibación de pozos.—La entibación de pozos está formada por cuadros horizontales que se colocan a una distancia que varía de 0,80

a 2 metros, según la naturaleza del terreno, y se fijan por pies derechos colocados en los ángulos. Cuando se trata de terrenos suficientemente coherentes, la entibación se limita a los marcos y pies derechos; cuando

Tipos de entibación

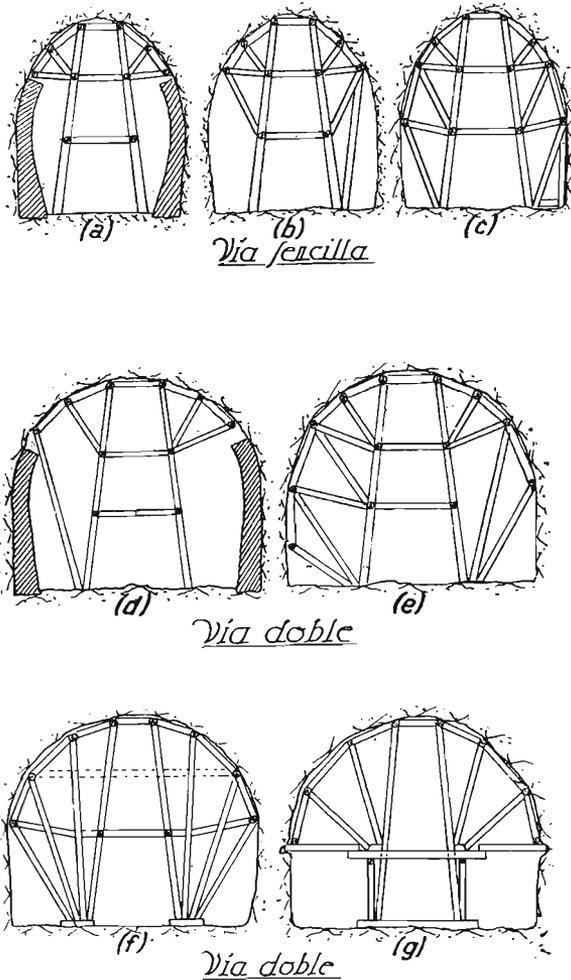


Figura 236.

la incoherencia del terreno lo exija, la entibación va forrada de tablas, que se introducen entre los marcos y el terreno y se fijan por medio de cuñas. Cuando el terreno es muy suelto, las tablas se van hincando a

golpes de martillo, previamente a la excavación, con objeto de evitar que las paredes se derrumben al excavar.

En terrenos que produzcan grandes empujes, los marcos se colocan prácticamente unos al lado de otros, y en algunos casos se refuerzan con marcos interiores; otras veces, se refuerzan con diagonales. En las figuras 237 y 238 pueden verse disposiciones adoptadas: la primera, para un

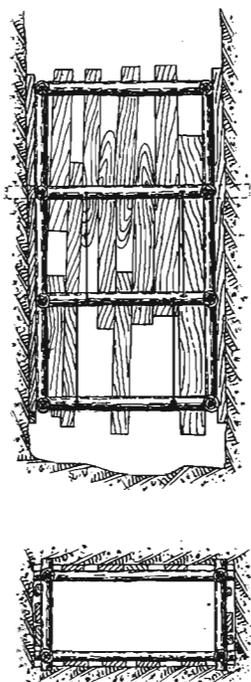


Figura 237.

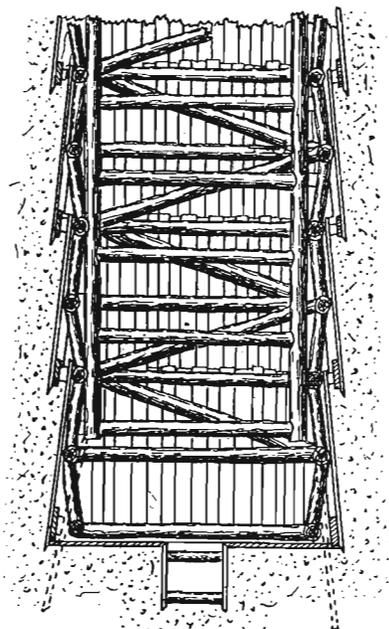


Figura 238.

terreno de empuje reducido, donde no es necesario forrar la totalidad de la pared, y la segunda, para un terreno falto en absoluto de cohesión, en el que es preciso reforzar con diagonales, haciendo además un forrado de tablas, que se va hincando por delante de la excavación.

220. Forma de efectuar la excavación.— La excavación, tanto en tierra como en roca, se realiza con los medios ordinarios que se utilizan para la excavación de caminos.

Únicamente hay que tener en cuenta, como característica especial común a todos los trabajos de esta clase, su pequeño frente de ataque,

circunstancia que encarece y dificulta la labor; ello hace sea imposible el empleo de grandes máquinas excavadoras, que tanto reducen el coste en trabajos a cielo abierto.

Cuando se trata de excavación en tierra, se emplea el pico y la pala



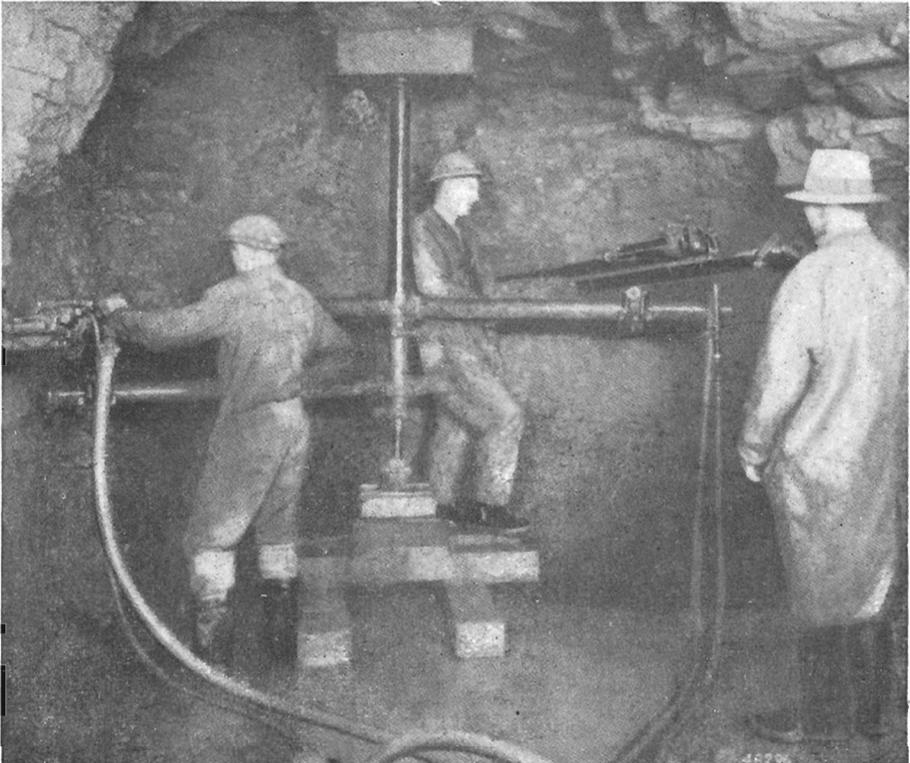
(Atentamente proporcionado por Ingersoll-Rand.)

Figura 239.

de punta; cuando el terreno a excavar sea de tránsito, se utiliza la barra y la maza; como único medio de excavación mecánica, se podrá utilizar la pala neumática, cuando se trate de terrenos duros, que no exijan el empleo de explosivos.

Para la excavación en roca, se utilizan los explosivos que se estu-

diaron en la excavación a cielo abierto; normalmente, los barrenos se realizan con martillos neumáticos; para trabajos de importancia siempre se emplea este sistema, pues el barrenado a mano, por su escaso rendimiento y el pequeño frente de trabajo, haría que el avance de la excavación fuera reducidísimo.



(Atentamente proporcionado por Ingersoll-Rand.)

Figura 240.

Las características fundamentales de las perforadoras y sus elementos de trabajo, son las estudiadas para las excavaciones a cielo abierto; como elemento auxiliar se emplean, especialmente en América, columnas para sostener uno o varios martillos (figs. 239 y 240) y, en algunos casos, plataformas móviles (fig. 241); para los barrenos en zonas altas se emplean martillos con soporte, que permiten su fácil manejo (fig. 242).

En la labor de perforación en túnel, cuando los trabajos son de importancia, se emplean generalmente instalaciones fijas de compresores en la boca del túnel, y el aire se lleva a la zona de trabajo por medio de

tuberías rígidas, de las cuales pasa a las tuberías flexibles de los martillos, en la forma que se explicó al tratar de la excavación a cielo abierto.

Los explosivos que se utilizan son los ya estudiados (epígrafes **163** y siguientes); no se emplea en general la pólvora negra, de poca potencia

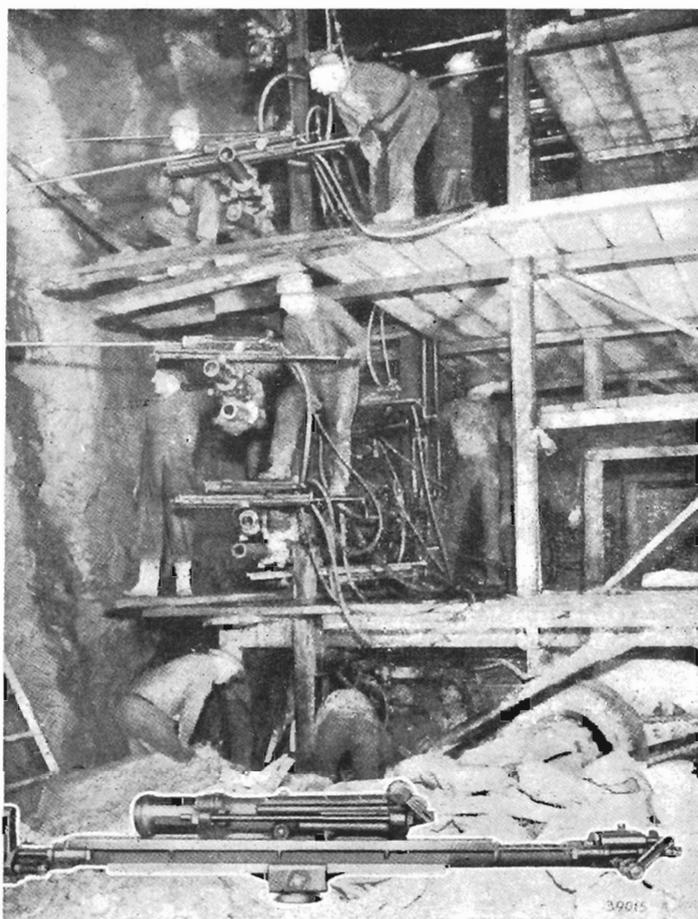


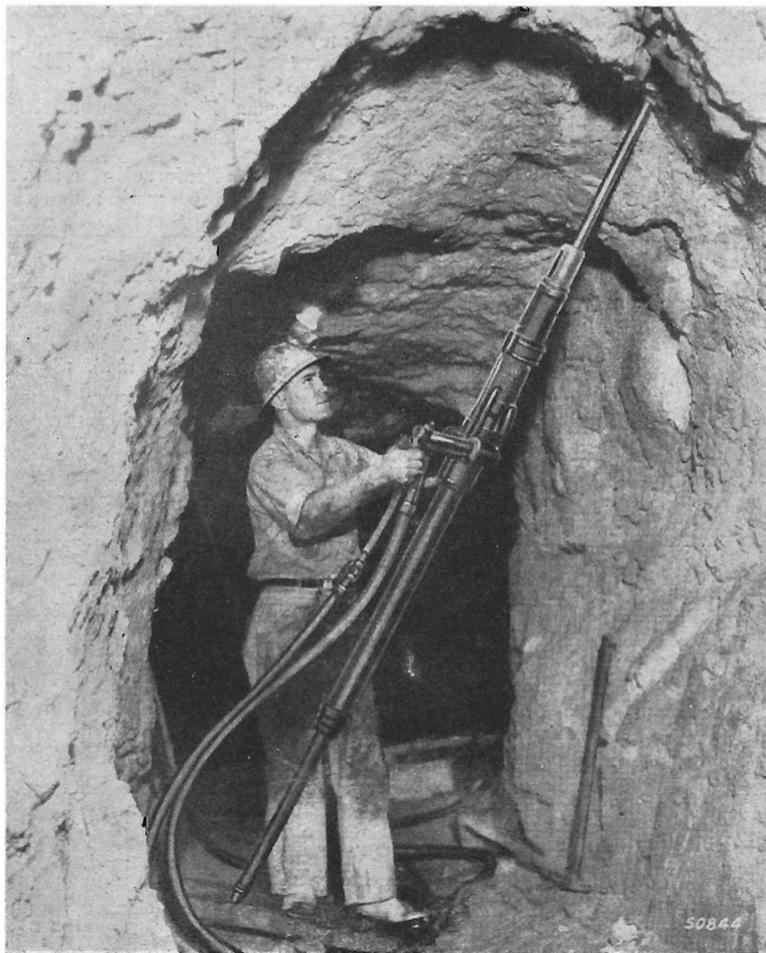
Figura 241.

y que produce gran cantidad de gases; normalmente, se utilizan explosivos de alta calidad, generalmente dinamita o gelatinadinamita.

El consumo de explosivos y la longitud de barreno precisa se resume en el cuadro de la página 358, tomado de DESIMÓN y TUNELBAU.

221. Disposición de los barrenos. — Es muy importante la disposición relativa de los barrenos para que den el rendimiento debido.

Como regla general, puede decirse que, con explosivos de acción lenta, pólvora negra, deberán practicarse los barrenos inclinados con rela-



(Atentamente proporcionado por Ingersoll-Rand.)

Figura 242.

ción al frente de la roca, aproximadamente 45° . Cuando se utilicen explosivos de acción rápida, como ocurre generalmente con la dinamita y gelatinadinamita, los barrenos se deberán ejecutar normalmente al plano de la roca.

CONSUMO DE EXPLOSIVOS EN GALERIAS DE AVANCE

N.º de orden	LUGAR Y FECHA DE LA OBRA	CLASE DE ROCA	MÉTODO DE PERFORACIÓN Y TIPO DE MÁQUINA EMPLEADA	Superficie de la sección en m.²	Superficie del barrenado en m.²	Longitud del barrenado en metros	Número de barrenos para cada voladura	Longitud total de barrenos en metros	Avance medio de cada voladura en m.	Avance en las 24 horas en metros	CONSUMO DE EXPLOSIVOS POR M.³ DE EXCAVACIÓN		Longitud total de barrenado en m. por m.³ de excavación	OBSERVACIONES
											CALIDAD	Kgs.		
1	Gotardo, 1875.	Gneis-granito muy duro.	Perforadora Ferroux, tipo antiguo, 10 HP.	6,10	40	1,10	20,66	22,70	1,00	3,00	Dinamita.	7,20	—	Roca durísima y tenaz.
2	Instalación hidroeléctrica de Rama, cerca de Kramesau, 1924.	Granito durísimo y tenaz en presencia del agua.	Perforación eléctrica de percusión.	4,80	49	0,75	16,00	12,00	0,49	1,47	Gelatina y dinamita I.	7,07	5,13	
3	La misma: Galería de avance principal, 1924.	La misma.	Perforación eléctrica de percusión; material Ingersoll B. C. R. 430.	4,80	49/45	0,95	19,00	18,05	0,62	1,85	Gelatina y dinamita I.	6,95	6,10	
4	Gotardo, 1878.	Serpentina durísima.	Ferroux 12 HP.	6,45	45/30	1,14	23,00	26,22	1,10	—	Dinamita.	8,90	4,30	Consumo medio, 7.5 Kg.
5	Gotardo, 1882.	Pórfido (Hornstein).	Fröhlich de 90 Kg.	7,15	40	1,15	22,00	25,30	0,68	1,71	Dinamita.	4,40	3,70	
6	Tauri, 1902.	Gneis-granito.	Brandt, mod. 1897-1901.	6,57	70	1,18	10,78	12,72	—	5,01	Dinamita y gelatina.	4,41	1,80	Roca granítica. Consumo muy reducido por barrenos de 0,50-0,60 m., pero grande el de desmontadores y mecha.
7	Tauri, 1902.	Gneis-granito.	Brandt, mod. 1901	4,20	70	1,11	9,82	10,90	—	5,19	Dinamita y gelatina.	5,47	2,68	
8	Loetschberg.	Granito.	Ingersoll.	6,20	70	—	—	—	—	5,37	Dinamita.	4,48	2,73	
9	Kehrtunnel am Leggistein.	Gneis-granito	—	6,00	35	1,50	—	—	—	—	Dinamita.	1,83	3,64	
10	Imp. del Rama, 1923.	Granito.	Ingersoll.	4,90	37/35	1,20	12,00	14,40	1,10	3,30	Dinamita.	3,30	2,68	
11	Oberhasliwerk-Svizzera, 1924.	Granito.	Flottman, tipo N.	5,50	32	1,00	16,00	16,00	0,54	2,16	Dinamita.	3,08	3,40	El consumo medio de explosivos para la excavación de galería de avance en granito de 4 Kg./m.³
12	Gotardo, 1875.	Gneis.	Ferroux.	6,00	40	1,29	17,00	21,93	1,10	3,80	Dinamita.	3,67	3,44	
13	Arbergtunnel, 1881.	Gneis.	Ferroux.	—	40	1,34	—	—	—	3,98	Dinamita.	3,15	4,15	
14	Simplón, 1901.	Gneis.	Brandt.	6,00	60/85	50	9,30	13,95	1,40	6,45	Dinamita.	3,35	1,67	El consumo medio de explosivos en esta roca resulta de 3.43 Kg. de dinamita por m.³
15	Simplón, 1901.	Gneis de Monte Leone.	Brandt.	5,71	60/85	42	9,80	13,92	1,29	6,30	Dinamita.	3,91	1,89	
16	Simplón, 1899.	Gneis.	Brandt.	5,62	72/50	25	10,80	13,50	1,11	4,39	Dinamita.	4,55	2,16	
17	Túnel de Freggio, 1881.	Gneis.	Fröhlich.	6,70	32/50	30	20,00	26,00	1,12	2,23	Gelatina y dinamita.	2,89	3,48	
18	Instalación hidroeléctrica de Teigitsch; galería de avance, 1924.	Gneis, sano.	Flottmann.	4,00	—	12	10,50	11,76	0,71	2,13	Dinamita.	3,52	4,15	
19	Simplón Norte, 1901.	Roca caliza esquistosa, con calcita y cuarzo.	Brandt, mod. 1897.	4,60	85/60	86	7,10	13,20	1,85	3,70	Dinamita.	3,64	1,60	Caliza y dolomía.
20	Simplón Norte, 1901.	Caliza cristalina y esquistosa.	Brandt, mod. 1897.	6,00	85/60	30	11,10	14,43	1,26	6,27	Dinamita.	4,90	1,90	
21	Caravanche-Norte, 1902.	Caliza (Triás).	Perf. eléct. a percusión.	6,50	45	90	15,00	28,50	1,60	—	Dinamita.	2,50	2,75	Consumo medio por m.³ de excavación, 3.24 Kg. de dinamita.
22	Caravanche-Norte, 1906.	Caliza y dolomía.	Perf. eléct. a percusión.	6,50	45	90	12,00	22,50	1,62	5,68	Dinamita 200 y gelatina 0.91.	2,91	2,18	
23	Loetschberg Norte, 1909.	Caliza.	Meyer, mod. H.	7,00	75	48	14,38	21,28	1,41	9,64	Dinamita.	—	2,21	
24	Achensee; galería de avance, 1923.	Caliza.	Böhler, mart. per. 15 Kg.	4,90	36/43	20	10,00	10,00	0,80	3,20	Dinamita I-23 y dinamita.	2,55	2,55	
25	Túnel del Arsa (Istria), 1932, marzo.	Caliza cretácea.	Flottmann.	7,00	32	30	19,00	24,70	1,10	7,70	Gelatina-dinamita 65 %.	2,80	3,20	
26	Gotardo, 1881.	Arenisca esquistosa.	Brandt.	8,40	70	20	5,00	6,00	1,14	4,00	Dinamita.	1,55	0,63	Consumo medio por m.³ de excavación, 1.50 Kg.
27	Túnel de Kralibger, 1880.	Arenisca (Bandsansteia).	Perf. a mano.	6,50	30	10	21,00	27,30	—	1,45	Gelatina y dinamita 0.85 y dinamita 0.40.	1,25	4,20	
28	Instalación hidroeléctrica de Kubel, cerca de S. Galles; galería de avance.	Arenisca.	—	1,00	—	—	—	—	—	1,35	Dinamita.	1,75	—	

La disposición relativa de los barrenos tiene gran importancia; habrá que buscar siempre un plano de mínima resistencia para que el rendimiento de la voladura sea el mayor posible. Así, por ejemplo, al iniciar los trabajos de la galería de avance, se deberán practicar unos barrenos inclinados (fig. 243), pudiendo ejecutarse los demás, prácticamente, normales; se volará primeramente la zona I; luego, la II, y, por último, la III; en la I, se encontrará la máxima resistencia, y por ello las cargas de los barrenos deberán ser mayores que en los siguientes. Los diámetros de los agujeros, su número, así como la carga, deberán deter-

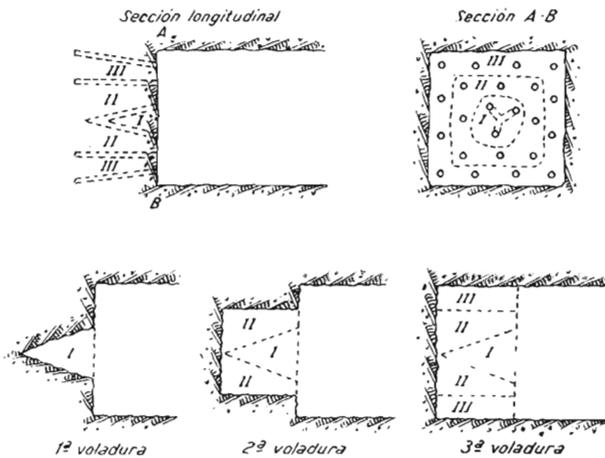


Figura 243.

minarse experimentalmente al iniciar los trabajos; como regla general, los agujeros deberán ser del mayor diámetro posible; los corrientemente usados, son los siguientes:

Para roca muy dura, granito, pórfido, etc	60 a 90 mm.
" " de dureza media o dura, estratificada	40 a 60 "
" " blanda o de media dureza, estratificada	30 a 45 "

La longitud corriente de los barrenos varía en Europa de 1,20 a 1,50 m., y en América, 2,40 a 3 m. La eficacia del número de agujeros y su longitud puede medirse por la relación:

$$\frac{\text{Progreso del avance}}{\text{Longitud total de barrenos}}$$

Generalmente, la eficacia es mayor para los agujeros cortos, tipo

europeo; pero, en cambio, tienen el inconveniente de precisar un mayor consumo de explosivos por metro cúbico de roca excavada.

222. El problema del transporte en la construcción de túneles.

El transporte de los productos excavados, debe considerarse con toda atención en el estudio económico de la construcción de un túnel; por su volumen y por las dificultades que lleva consigo, teniendo en cuenta el pequeño espacio disponible, que no permite emplear medios mecánicos de carga ni de transporte importantes. El volumen a transportar es considerable; en grandes túneles, en cuanto los trabajos van avanzando, según la distancia de transporte hasta la boca crece, aumenta rápidamente el precio del transporte; el problema es más grave, por tanto, cuanto menor sea el número de bocas de ataque; como no es posible, por las disponibilidades de espacio, aumentar la capacidad de transporte en la medida que se haría en una excavación a cielo abierto, y como, por otra parte, lo reducido del frente de ataque impide realizar labor alguna mientras no se haya descombrado, puede el lector darse cuenta fácilmente de cómo puede influir el transporte en la marcha de la obra, y en definitiva, en su coste. Hay que tener en cuenta, por otra parte, que no se trata sólo de extraer de la galería los productos de la excavación; es preciso, además, transportar a la zona de trabajo los materiales y medios auxiliares necesarios.

En todo trabajo de túneles se pueden distinguir cuatro zonas: 1.^a, la galería de avance; 2.^a, excavación de la "destroza" a plena sección; 3.^a, la zona de revestimiento, y 4.^a, la galería terminada. En las tres primeras zonas, especialmente en las dos primeras, el transporte será más difícil cuanto menos coherente sea el terreno y, por tanto, más complicada la entibación de la galería. En la disposición general del transporte, se deben considerar dos zonas importantes de carga: la primera, en la boca del túnel, donde se deberá establecer un depósito de materiales y herramientas que se han de transportar al interior, y la segunda, en el punto de carga de escombros; la primera no tiene singularidad alguna de importancia; la segunda, en cambio, por la forma en que el trabajo ha de desarrollarse, merece que se estudie detenidamente.

El movimiento de los escombros, dentro de la galería de avance, ha de hacerse a mano; corrientemente, con carretillas o vagonetas pequeñas; con ellas se llevan los escombros al origen de la galería de avance, en cuyo punto se cargarán a los vagones que han de extraerlos del túnel. Para facilitar la carga, es conveniente situar una plataforma que, saliendo a nivel con el piso de la galería de avance, permita volcar las carretillas directamente a los vagones; si la plataforma, que puede ser móvil,

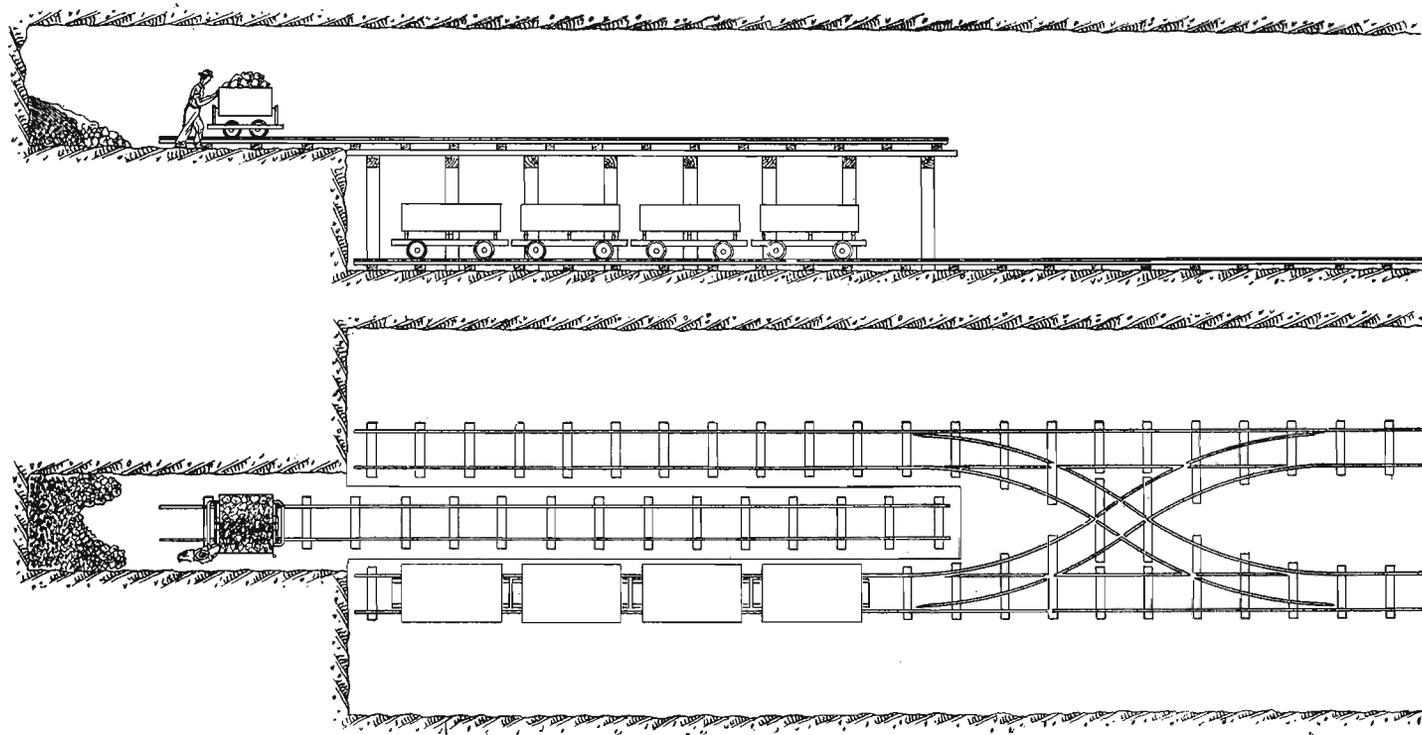


Figura 244.

tiene una longitud igual a la de los trenes que se empleen en el transporte, éstos, entrando con la máquina en cola, pueden fácilmente cargar, y salir el tren, con la máquina en cabeza (fig. 244). El material arrastrado que se emplea para el servicio, son vagones o vagonetas, según la importancia del transporte a realizar; pueden ser de diferentes clases, dependiendo del servicio a que hayan de ser destinados; pueden emplearse vagones fijos, volquetes, o bien de bastidor fijo con cartelas abatibles; su construcción puede ser totalmente metálica o mixta, de madera y metálica; en algunos países se emplean vagones totalmente de madera, incluso el bastidor, en los que únicamente las ruedas y sus ejes son metálicos.

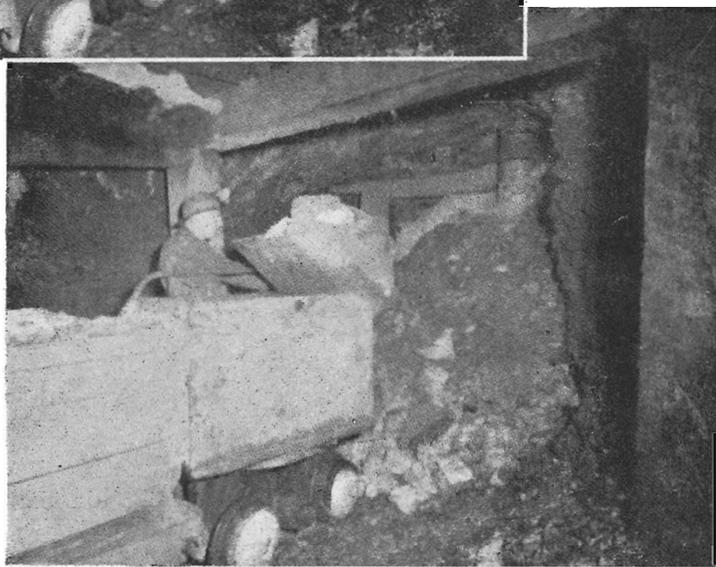
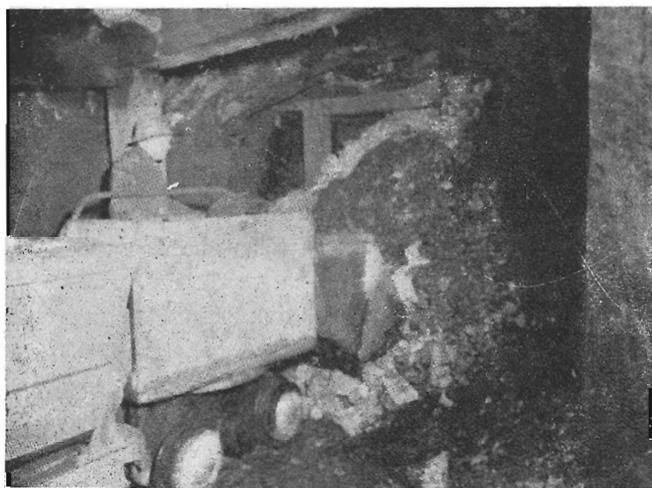
Las dimensiones del material a utilizar dependen de la naturaleza y volumen de la obra de que se trate; los trenes deben marchar a una velocidad media de 8 a 12 Km. hora.

La vía, para trabajos normales, puede ser de 7 a 10 Kg. por metro lineal; en vías de este tipo, la velocidad no debe exceder de 8 Km. hora, ni el peso de los vagones, cargados, de 5 toneladas; para túneles de gran longitud y con el fin de alcanzar, con la seguridad precisa, velocidades de 12 a 15 Km. hora, se emplean carriles hasta de 24 Kg. por metro lineal. El ancho de vía varía de 0,60 a 0,80 m.; no pueden emplearse anchos mayores por el reducido espacio en que ha de moverse este material. Las locomotoras pueden ser de vapor, eléctricas, de aire comprimido o Diesel; la locomotora de vapor, no es recomendable por el humo que produce; cuando exista electricidad a precio aceptable, la tracción eléctrica tiene ventajas indudables; con las mínimas dimensiones, pueden desarrollar el máximo esfuerzo de tracción, no vician el aire y alcanzan una considerable velocidad comercial.

Es muy recomendable, para esta clase de trabajos, la locomotora de aire comprimido; éste se carga a la entrada del túnel, a una presión de 150 a 200 atmósferas, en cilindros de 30 a 50 cm. de diámetro. Tienen el inconveniente de ser de tamaño bastante grande.

Las locomotoras Diesel son de elevado rendimiento; el principal inconveniente de este sistema de tracción son los gases del escape, entre los cuales se encuentra el CO, cuyos peligros hemos estudiado.

223. Medios mecánicos de carga. — Especialmente contruídos para su empleo en espacio reducido, existen aparatos de carga automática (fig. 245); consisten en una pequeña cuchara, cuya capacidad varía de 0,350 a 2 metros cúbicos; va montada sobre un carretón, que se coloca en el extremo de la excavación sobre la misma vía de servicio y realiza la carga de los escombros en la forma que puede verse en las fotografías. Todos los mandos del aparato son de aire comprimido.



Estos aparatos, poco utilizados hasta ahora en Europa en la construcción de túneles, se han empleado mucho en América del Norte, especialmente en las explotaciones mineras.

224. Transporte vertical. — La extracción de los productos de la excavación por pozos auxiliares tiene dos inconvenientes: el coste del transporte es más elevado que en horizontal, y la capacidad de extracción es pequeña.

El coste aumenta rápidamente con la profundidad; la distancia virtual horizontal es, según DESSIMÓN:

Profundidad del pozo. — Metros.	MÉTODO DE ELEVACIÓN			
	Torno de mano.	Cabrestante movido por		Mecánico.
		Un caballo.	Dos caballos.	
15	29,1	8,4	6,5	5,5
30	32,4	9,2	7,1	6,0
60	38,7	11,0	8,2	6,9
90	45,2	12,6	9,0	7,6
120	56,2	14,3	9,9	8,3

Los costes de transporte obtenidos para horizontal vendrán, por tanto, multiplicados por los coeficientes indicados para obtener el coste del transporte vertical; se ve no conviene, económicamente, más que en casos excepcionales, la extracción de los productos de la excavación, por pozos. Al inconveniente económico, hay que añadir el no menos importante de la capacidad de transporte; aun con instalaciones de elevación mecánica, que son costosas, la capacidad de extracción de los productos, se reduce considerablemente cuando los pozos tienen gran profundidad. Por ello, el ataque por pozos no se realiza más que en los túneles de metropolitanos, o en terrenos muy incoherentes, en los cuales, por ser el avance lentísimo, es preciso multiplicar los puntos de ataque, si no se quiere prolongar excesivamente el plazo de construcción.

Los métodos empleados para el transporte vertical de escombros, son: el antiguo procedimiento del torno de mano, movido por dos hombres, que extrae los productos en cestos, espuertas o baldes (fig. 246); el método cabrestante, movido por caballerías, o bien mecánicamente por un motor, que hace subir o bajar, dentro del pozo, los recipientes de transporte, arrollando el cable en un tambor; en trabajos importantes se em-

plean montacargas; el que reproduce la figura 247 es el utilizado en la construcción del Metropolitano de Madrid por la empresa Agromán.

225. Métodos de excavación en terrenos no coherentes. — En terrenos de pequeña coherencia, es preciso llevar a cabo la excavación por zonas reducidas consecutivamente, con el fin de: 1.º, que sean un mínimo las luces de la entibación, para que las escuadrías y la cantidad de ma-

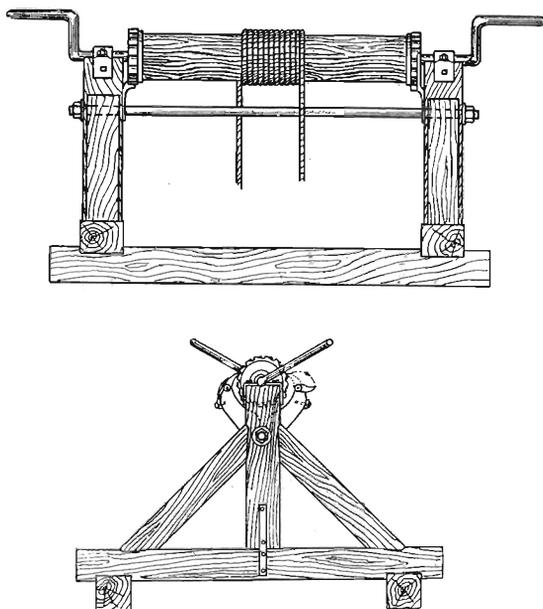


Figura 246.

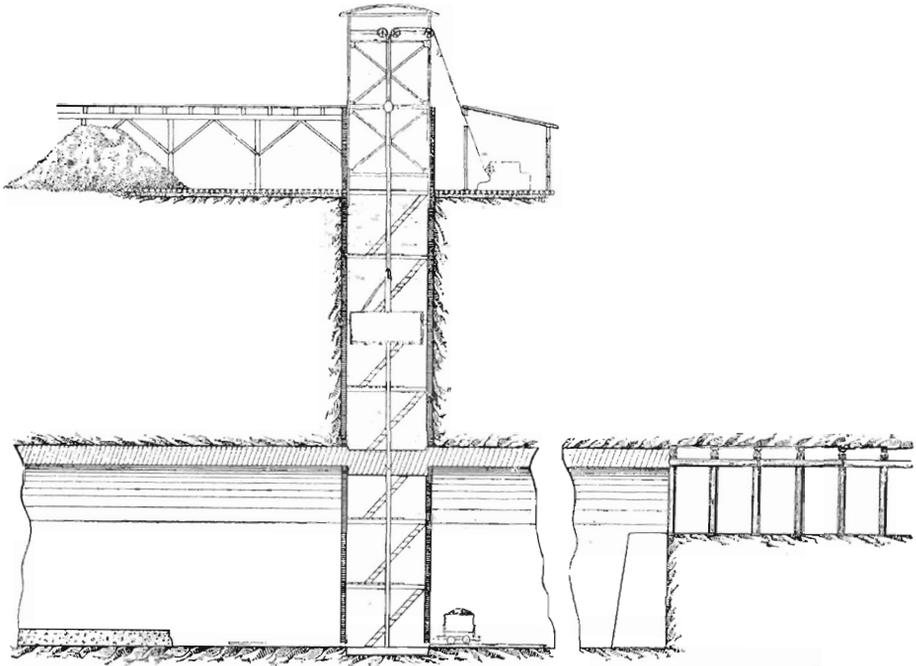
dera no sean excesivas, y 2.º, de revestir, inmediatamente después de excavado cada uno de los sectores, para que sea mínima la zona excavada sin revestir.

Solamente así, es posible realizar la obra en condiciones aceptables de economía y, en muchos casos, incluso ejecutarla, pues si los vanos a entibar fuesen grandes, la cantidad de madera necesaria para resistir los fuertes empujes del terreno resultaría, no solamente de coste prohibitivo, sino que llegaría a hacer imposible o costosísimo, por falta de espacio, el trabajo en la excavación.

Los distintos procedimientos, se diferencian solamente por el orden de realizar la excavación.

226. **Método alemán.**— Es característica de este sistema conservar el núcleo central, para apoyo de la entibación.

Primitivamente (fig. 248, *a*), se excavaban pequeñas galerías en el orden que la figura indica; la entibación se reducía a un mínimo; los



(Atentamente proporcionado por la Empresa Agromán.)

Fig. 247. — Montacargas empleado en el Metro de Madrid.

estribos eran los que primero se construían, no siendo de temer, por ello, asientos en la bóveda; posteriormente, se cambió el orden de la excavación, siguiéndose el indicado en la figura 248, *b*, que permitía realizarla

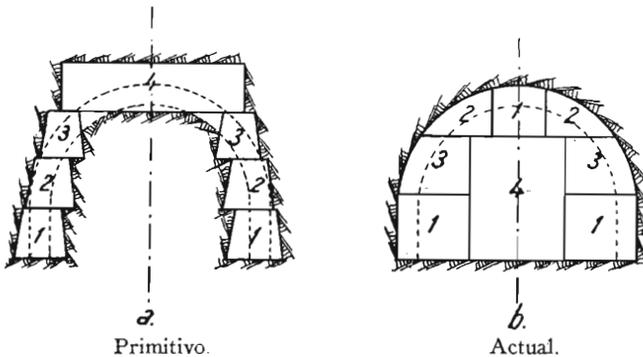


Fig. 248. — Esquema método alemán.

más fácilmente; en la excavación del túnel de Königsdorf (fig. 249), el empuje, muy fuerte, del terreno, hacía imprescindible la construcción de una contrabóveda; hechas las excavaciones de los estribos y construídos éstos, de 15 en 15 m., se ejecutaban en el fondo del núcleo central galerías transversales (*b*) que permitían construir trozos de la contrabóveda, que apuntalaban los estribos; al excavar el núcleo central se apuntalaban los estribos hasta que se construía y fraguaba la contrabóveda (*d*). Este

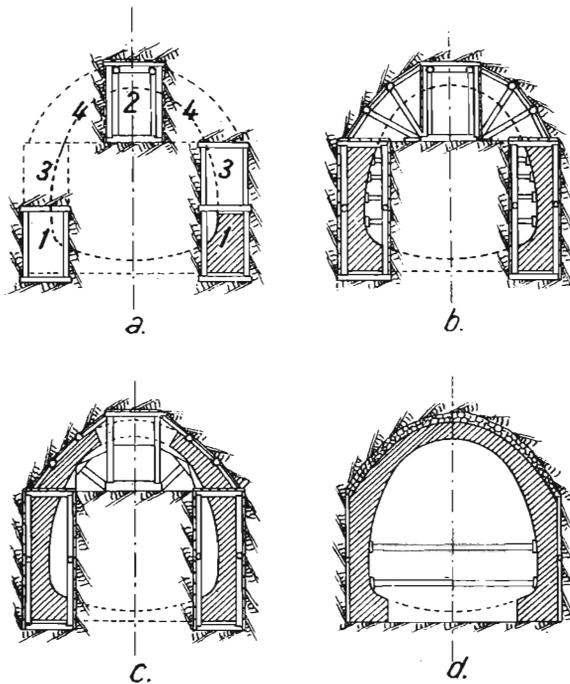


Fig. 249.— Método alemán de contrabóveda.

método es caro y lento; sólo resulta recomendable en túneles de grandes secciones y terrenos de fuertes empujes; tiene la ventaja indudable de que se empieza por construir los estribos y, sobre ellos, ya fraguada la fábrica, se apoya la bóveda, no siendo, por tanto, de temer asientos en ella; la cantidad de madera necesaria para la excavación es mínima.

227. Método inglés.— La forma de llevar la excavación por este sistema, es la indicada en la figura 250. *a*. Para que se pueda aplicar con éxito, es necesario que el terreno tenga suficiente cohesión. La galería de avance se ensancha con las 2; se ejecuta después la galería inferior, 3,

y, cuando se excava la zona 4, se colocan estampidores horizontales en la forma que puede verse en la figura 250, *b* y *c*; el frente de la excavación, se forra en su totalidad; queda, en esta forma, la sección del túnel completamente excavada, y el revestimiento puede hacerse empezando la solera o contrabóveda, continuando con los estribos y terminando con la bóveda; se tiene seguridad de que no existirán asientos, y la construc-

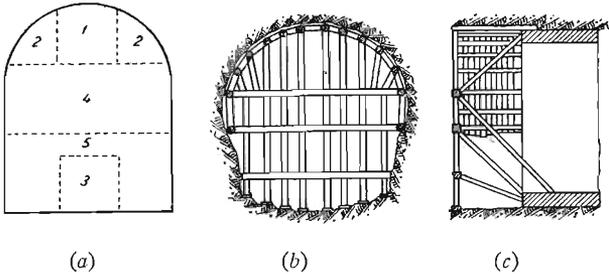


Fig. 250. — Método inglés.

ción de la fábrica se realiza fácilmente; la excavación se ejecuta por longitudes de 3 ó 4 m., que se revisten inmediatamente después de excavados. El sistema, que tiene la ventaja de la facilidad de realización del revestimiento, precisa que los empujes del terreno no sean grandes, pues, si lo fueran, exigiría gran entibación.

228. Método belga. — Este método, que ha sido muy empleado, consiste en excavar primeramente la parte correspondiente a la bóveda

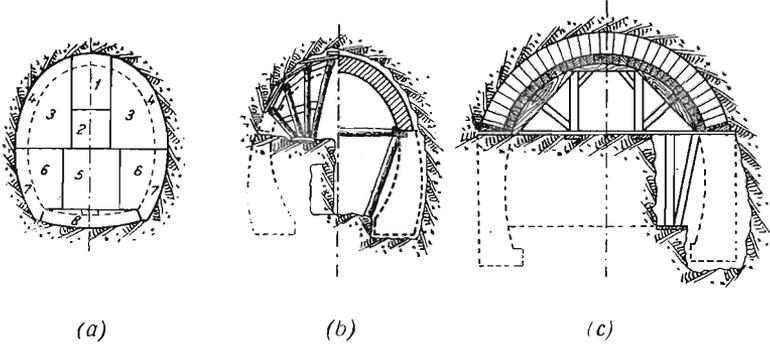


Fig. 251. — Método belga.

que se construye, apoyándola sobre el terreno; la progresión clásica de los trabajos, es la que puede verse en la figura 251, *a*. Para construir los estribos es imprescindible, en un momento dado, apuntalar la bóveda ya

ejecutada, lo que puede hacerse en la forma que se indica en la figura 251, *b* y *c*; el apuntalado de la bóveda es delicado, y aunque se adopten las mayores precauciones (fig. 252), siempre es expuesto a asentos. El sistema, frente a este inconveniente, tiene la ventaja de ahorrar una

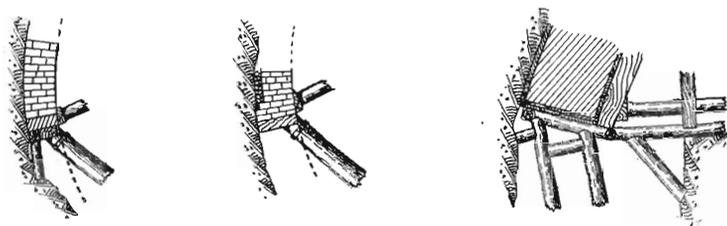


Fig. 252. — Método belga.

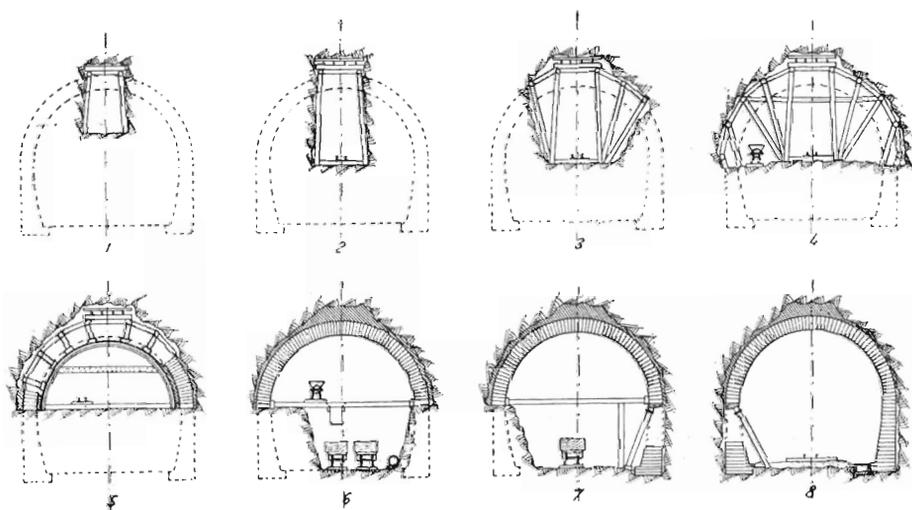


Fig. 253. — Método belga.

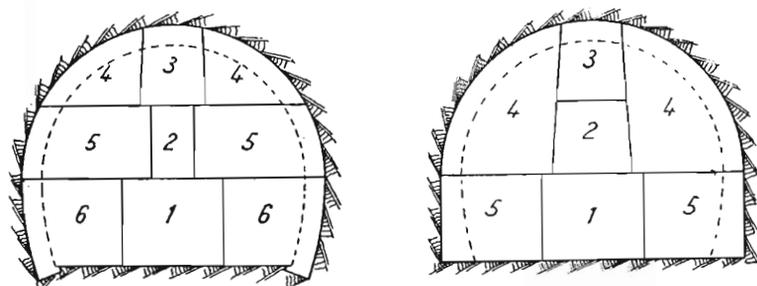


Fig. 254. — Esquema variación método belga.

gran cantidad de madera de entibación y de que el movimiento de materiales es sencillo y siempre descendente. En la figura 253 puede verse un esquema clásico del desarrollo de los trabajos. Este método ha sufrido

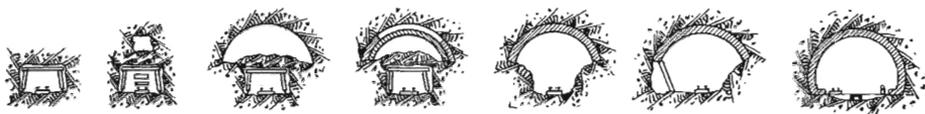


Fig. 255, a. - Método belga. Túnel de Mont d'Or.

gran número de variaciones; la más interesante es la de llevar la galería de avance en la parte baja, como puede verse en la figura 254; la figura 255, a, muestra el desarrollo de este procedimiento en el túnel de Mont d'Or; en la figura 255, b, se detalla la aplicación de este método a la excavación del Metropolitano de Madrid por la sociedad Agromán.

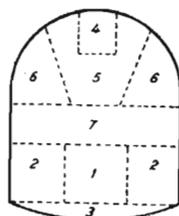
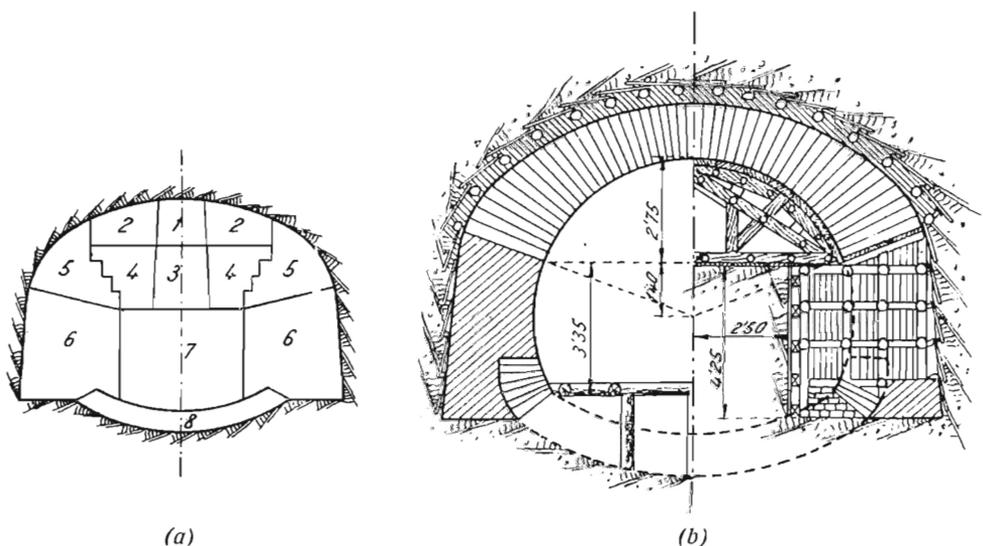


Figura 256. Método italiano.

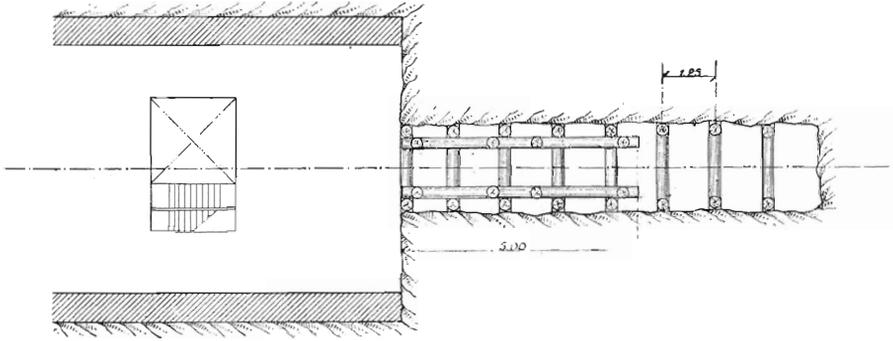
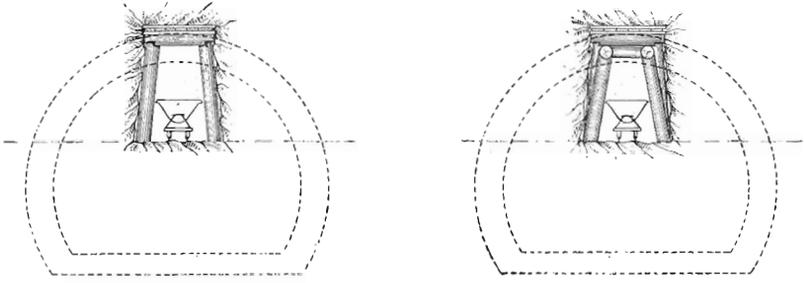
229. Método italiano. — La característica fundamental de este método consiste en efectuar la excavación de pequeños espacios, en los cuales se efectúa rápidamente el revestimiento; se utiliza principalmente en terrenos que, recién excavados, tienen cohesión, pero que, en contacto con los agentes atmosféricos, la pierden o se hinchan, dando lugar a empujes excepcionales. La forma normal de desarrollar los trabajos es la indicada en el esquema de la figura 256; en casos de empujes excep-



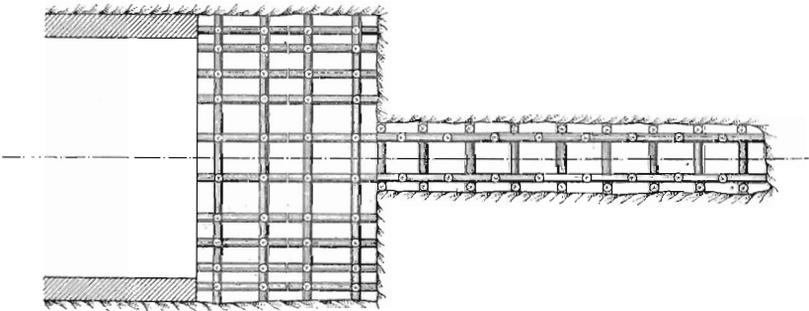
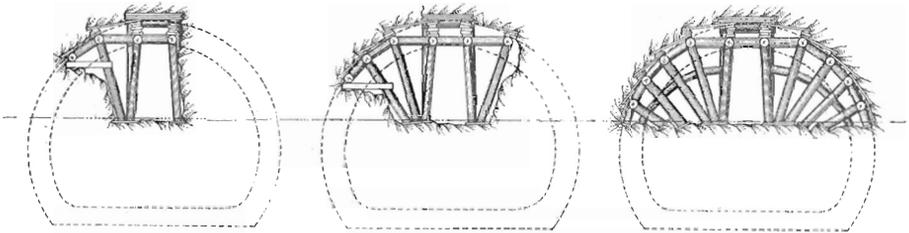
(a)

(b)

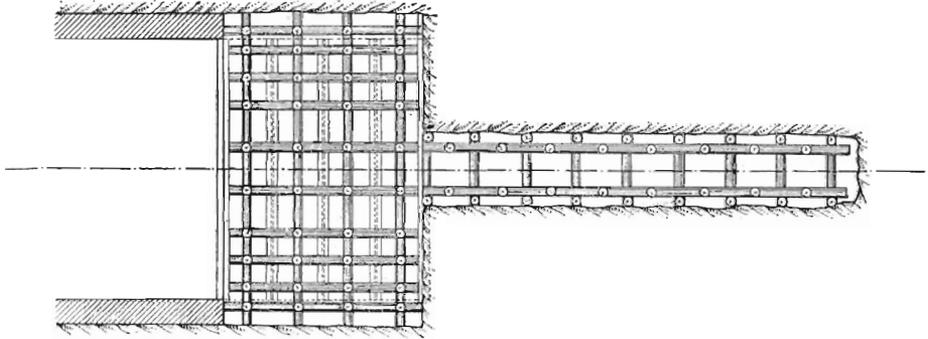
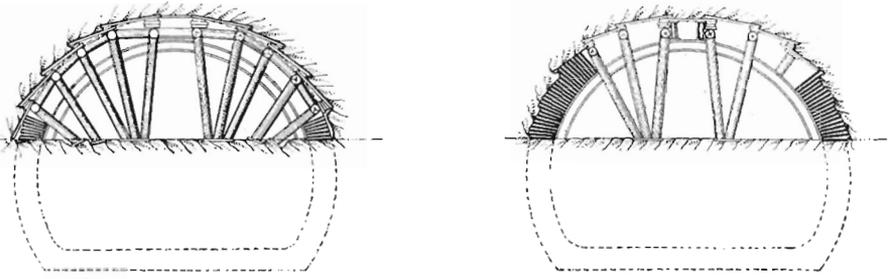
Fig. 257. — Esquema modificación excepcional, método italiano.



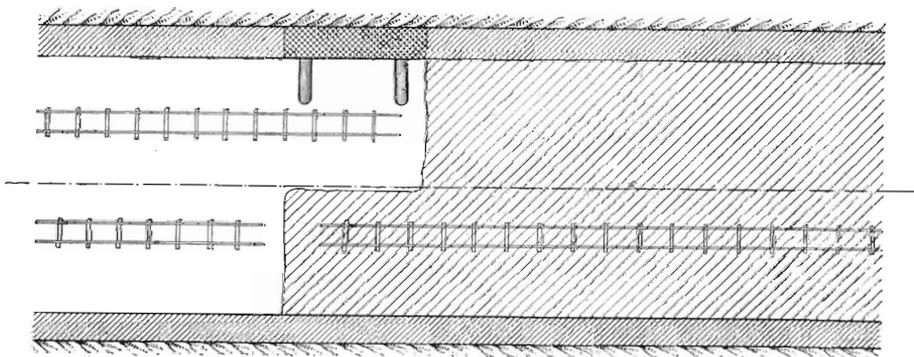
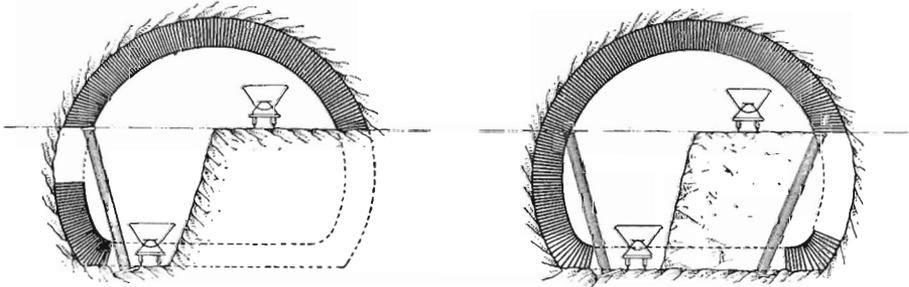
1. Galería de avance.



2. Excavación y ventilación de la bóveda.



3. Construcción de la bóveda.



4. Destroza y construcción de los estribos.

Fig 255. b.—Esquema del desarrollo de los trabajos del Metropolitano de Madrid.
(Atentamente proporcionado por la Empresa Agromán.)

cionales, puede alterarse el orden de las dos primeras excavaciones; es decir, realizar las galerías 2, apoyando la entibación sobre el núcleo 1; construídos los estribos, se excava 1, y después, 3, para ejecutar la contrabóveda; en algunos casos, la excavación se empieza por la parte superior (fig. 257); el procedimiento, en este caso, es muy similar al método belga. Cuando el terreno origina empujes excepcionales, la zona reves-

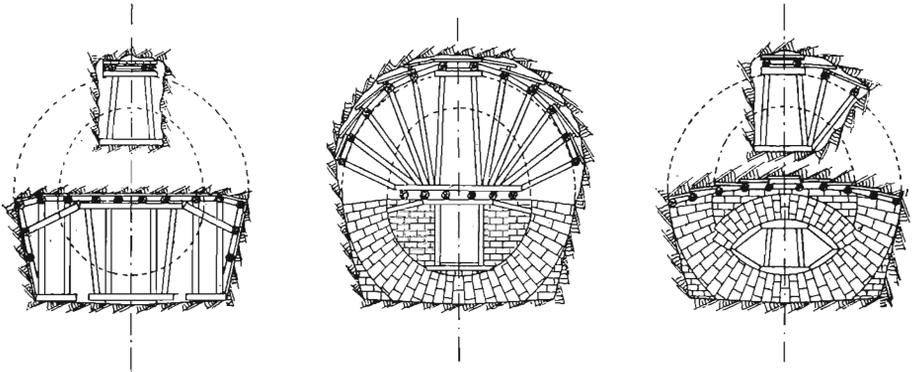


Fig. 258. — Rellenos provisionales en el método italiano.

tida se va rellorando, en parte, de fábrica en seco o rejuntada con mortero de cal, para reducir al mínimo las escuadrías de la entibación, que de no ser así, deberían tener dimensiones excesivas y antieconómicas; se da, además, la suficiente resistencia al apoyo de la entibación de zonas difíciles (fig. 258). La fábrica provisional se va destruyendo, a medida que queda completamente revestida la sección.

230. Método austriaco. — La galería de avance va situada en la parte inferior de la sección; el trabajo puede desarrollarse en las dos formas que se indican en la figura 259, a; el nuevo método austriaco es

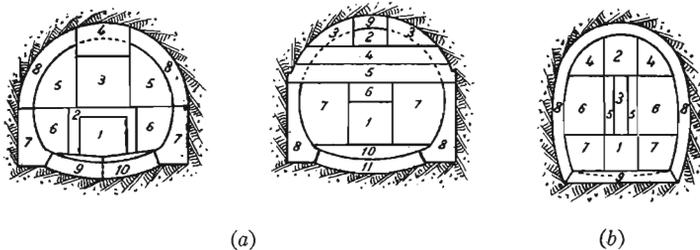
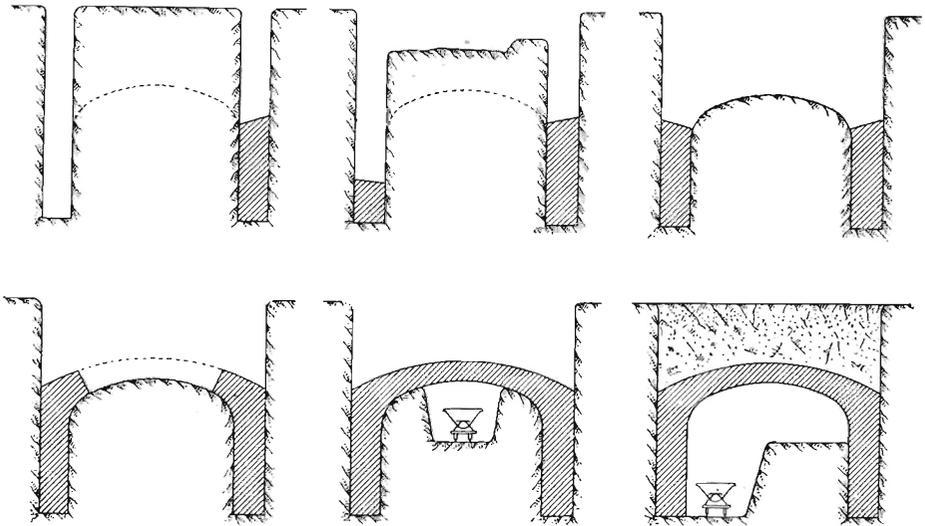


Fig. 259. — Método austriaco.

consecuencia de los anteriores (fig. 259, b); los esquemas no precisan explicación.

231. Construcción de un túnel metropolitano a cielo abierto. —

Es muy acertada la forma de llevar a cabo la excavación de un túnel a cielo abierto, empleada en el Metropolitano de Madrid (fig. 260); el te-



(Atentamente proporcionado por la Empresa Agromán.)

Fig. 260. — Excavación a cielo abierto del Metropolitano de Madrid.

rreno mismo sirve de encofrado para la construcción de la bóveda, con gran economía en el coste de la obra.

232. Resumen y criterio. — En un terreno incoherente, la excavación ha de estar sin revestir el menor tiempo posible, pues la exposición del terreno excavado, a los agentes atmosféricos, aumenta en gran proporción los empujes. Cuanto más incoherente sea el terreno, más necesario es que la excavación vaya inmediatamente seguida del revestimiento. Por otra parte, cuando los empujes son grandes, la excavación total de la sección, exigirá una entibación carísima; por ello, conviene excavar por partes, aprovechando el terreno mismo para sostener la entibación. La elección de uno u otro de los sistemas expuestos, depende, por tanto, de la naturaleza y características del terreno a excavar.

Cuando sea posible, no conviene, para una buena estabilidad del revestimiento, construir éste empezando por la bóveda, como se hace en el método belga, por ejemplo, sino, al contrario, empezar por los estribos y terminar por la bóveda. Cuando se construya primero la bóveda habrá que adoptar las máximas precauciones, para evitar asientos.

Los métodos expuestos no son inalterables; pueden modificarse y se modifican constantemente en la práctica, para resolver los problemas expuestos de la manera más adecuada a cada caso particular.

233. Métodos extraordinarios de excavación. — En terrenos muy incoherentes, y cuando existen grandes filtraciones — túneles debajo del agua — es imposible efectuar la excavación por los métodos expuestos,

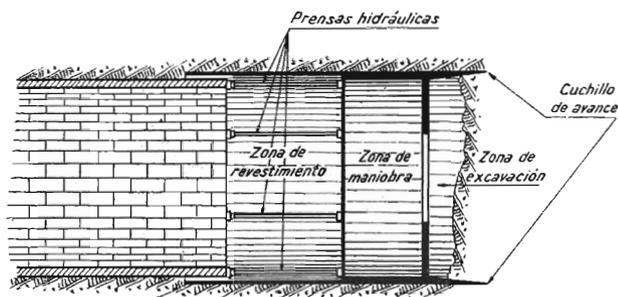


Fig. 261. — Esquema del trabajo con escudo.

siendo necesario recurrir a procedimientos especiales. Son los más corrientes:

- 1.º El método del escudo, con o sin aire comprimido.
- 2.º Construcción de la sección fuera del terreno y su colocación por trozos, en excavación previamente preparada; este sistema se emplea especialmente para túneles debajo del agua.
- 3.º Método de congelación del terreno o consolidación por medio de inyecciones de cemento.
- 4.º Construcción a cielo abierto.

234. Procedimiento del escudo. — La excavación de terrenos muy sueltos, especialmente cuando tienen gran cantidad de agua, precisa vaya la entibación inmediatamente después de la excavación, y aquélla, por otra parte, habrá de ser impermeable, para evitar la filtración del agua y, como consecuencia, el arrastre del terreno, dando lugar a socavones y desprendimientos, causa de cargas accidentales extraordinarias; realizar

el trabajo con estas garantías no es posible con los medios corrientes de entibación; no se puede entibar en el momento mismo en que se realiza la excavación, ni pretender que las juntas entre las tablas sean impermeables. Por ello, se recurre a construir un encofrado metálico continuo e impermeable por tanto, que, por medio de unos cuchillos, *A* (fig. 261), avanza en el terreno, empujado por unos gatos o pistones hidráulicos, que se apoyan en la fábrica ya construída.

El escudo avanza en el terreno; los cuchillos se van hincando dentro de él, revistiendo el perfil antes de que la tierra se excave; esta primera zona va separada, por un tabique metálico vertical, del resto del escudo; el tabique tiene una entrada a la zona de excavación, por la cual se va sacando el material excavado; inmediatamente después del tabique de separación vertical, queda una zona de trabajo en la cual se efectúan las

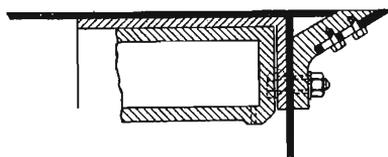


Figura 262.

maniobras precisas para el avance del aparato, extracción y carga de los materiales; por último, queda una tercera zona, en la cual no existe más que el revestimiento de la zona excavada y los gatos o pistones hidráulicos, que sirven para hacer avanzar el conjunto del dispositivo: los gatos se apoyan sobre el revestimiento ya construído.

La parte del escudo sujeta a trabajo más intenso, es la cuchilla de corte; tiene que estar construída con la mayor solidez y debe poderse cambiar con facilidad; se emplea la disposición de la figura 262; la parte de corte, que se construye de acero, va aplicada a la armazón del escudo simplemente por unos tórnillos, que permiten cambiarla fácilmente.

La armadura del escudo debe estar proyectada en forma tal, que resista a los esfuerzos a que ha de soportar; será más reforzada a medida que los diámetros sean más grandes; cuando los diámetros son mayores de 3 metros, se recurre a dividir el escudo por tabiques horizontales y verticales.

Las dimensiones de los escudos hasta ahora construídos varían entre 2,10 y 9,30 m., y sus longitudes, de 1,90 a 6 m.; su superficie de rozamiento es, por tanto, de 12,50 a 175 m.². La potencia precisa para mover el escudo depende del coeficiente de rozamiento entre éste y el terreno: pue-

de considerarse que es, aproximadamente, de 400 toneladas por metro de diámetro del escudo.

Para disminuir el esfuerzo máximo preciso para mover el escudo, se puede recurrir a llevar, por delante, una pequeña galería de avance (figura 263), con lo cual la resistencia que el escudo encuentra es mucho menor; claro está que el trabajo se complica, pues no es sencilla la cons-

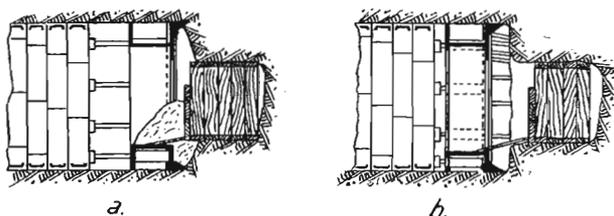


Figura 263.

trucción de la galería de avance, en un terreno de malas condiciones. Según *Der Tunnel*, la potencia que se necesita es la siguiente:

Diámetro del escudo. — Metros.	Longitud del escudo. — Metros.	Esfuerzo en una sola prensa.	
		Avance a sección completa. — Toneladas.	Con galería de avance. — Toneladas.
2,1-3,3	1,9-2,3	40-60	10-15
3,3-6,6	2,0-4,6	60-100	15-20
6,0-9,3	5,5-6,0	100-140	30-40

El escudo, generalmente, se construye de forma circular, aunque se han construido también alguna vez escudos de forma elíptica.

235. Empleo del aire comprimido. — Cuando es preciso excavar un túnel en un terreno con gran cantidad de filtraciones — especialmente los túneles que pasan por debajo del agua — la excavación presenta dificultades importantes, pues hay que evitar filtraciones a través del encofrado, que son causa de desprendimientos, origen de cargas accidentales importantes.

El empleo del aire comprimido — elevar la presión en la excavación — equilibrará la presión producida por el agua, evitando las filtraciones y reduciendo la carga sobre la entibación; se puede trabajar prác-

ticamente en seco, con indudables ventajas, no sólo para la excavación, sino también en la ejecución de la fábrica de revestimiento.

El aire comprimido puede usarse utilizando el procedimiento del escudo, o sin él; sin escudo se ha empleado, entre otros, en los túneles de Gattico, en Italia; Emmersberg, en Suiza, y Eastriew, en la traída de aguas de Nueva York.

En líneas generales, toda instalación de aire comprimido tiene que constar de un tabique de cierre que aísla el tramo de trabajo del túnel ya construido; este tabique debe ser impermeable al aire, para que pueda servir de separación entre la zona de presión atmosférica y la de alta presión; la entrada y salida a la cámara de trabajo, del personal y materia-

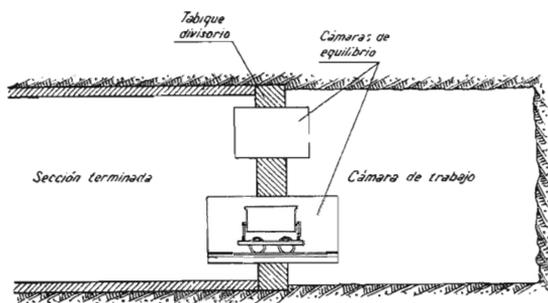


Fig. 264. -- Esquema de la excavación con aire comprimido.

les, debe hacerse a través de cámaras de equilibrio, que permitan el tránsito paulatino entre las dos presiones; en la figura 264 se representa un esquema de instalación de este tipo.

El tabique, cuando no se emplea escudo, puede construirse de fábrica, y las cámaras de entrada y salida, metálicas; en el caso de que el aire comprimido se emplee con escudo, el tabique de separación, así como las cámaras de equilibrio, van montadas en aquél. En el caso de que el tabique de separación sea de fábrica, habrá que reconstruirlo cada vez que la cámara de trabajo sea excesivamente grande.

En la figura 265 puede verse la disposición general de una instalación de aire comprimido, sin escudo; la cámara de servicio superior es para el personal, y la inferior, para la entrada de materiales y extracción de productos de la excavación.

Un ejemplo interesante del empleo del aire comprimido, no para excavación, sino para la construcción de un túnel por hinca de secciones previamente construídas es el túnel de Gattico; este túnel, situado en Italia, cerca de Borgomanero, tiene una longitud de 3.160 m.; en toda su construcción se tropezó con dificultades de importancia, pero es-

pecialmente en los 500 m., a partir de la boca de la parte Sur, la presencia de un terreno de arena suelta, con gran cantidad de agua, hizo prácticamente imposible su construcción por los medios corrientes y hubo que recurrir al siguiente procedimiento: se excavó la superficie del terreno hasta una cierta profundidad, según puede verse en las figuras 266-267,

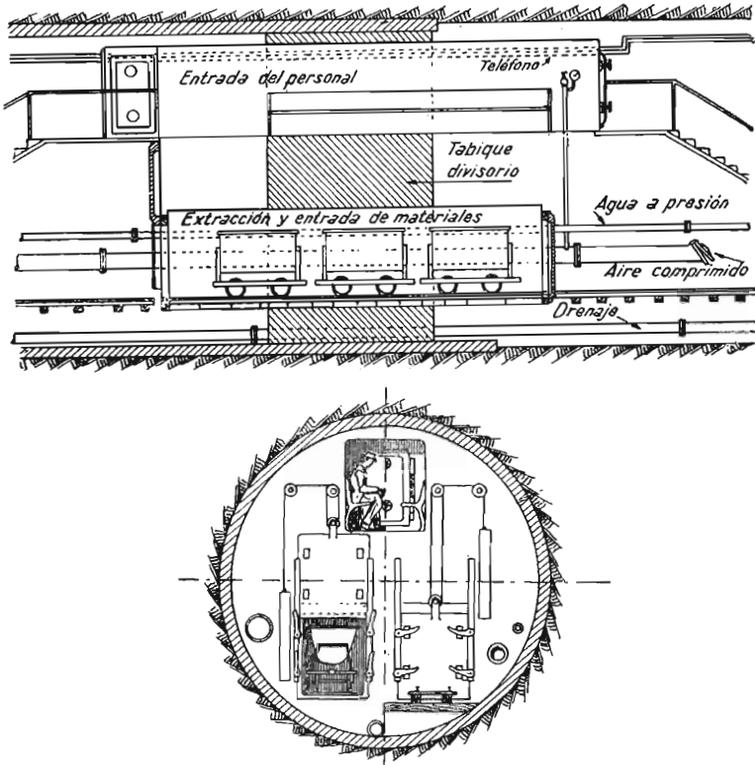
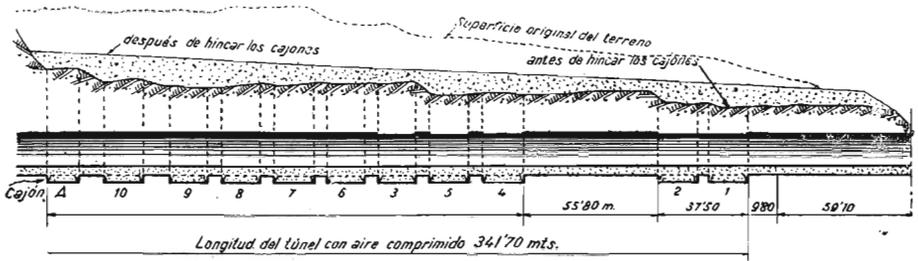


Fig. 265. — Detalle de muro divisorio en un trabajo con aire comprimido.

construyéndose el túnel a base de la hincada de 11 cajones de 17 m. de longitud y 6,75 m. de ancho; la hincada se hizo por el procedimiento corriente de aire comprimido, construyéndose la fábrica del túnel a medida que el cajón iba descendiendo. Se hincaron por este procedimiento los cajones 1 y 2, pero como el sistema resultaba muy lento y costoso, se decidió emplear directamente el aire comprimido; en esta forma se construyó una longitud de 55,80 metros, pero el método resultó más costoso y lento que el de cajones, al cual se volvió, hasta terminar una longitud total de 341,70 m. a partir del origen del primer cajón.

TUNEL DE GATTICO



a.

Figura 266.

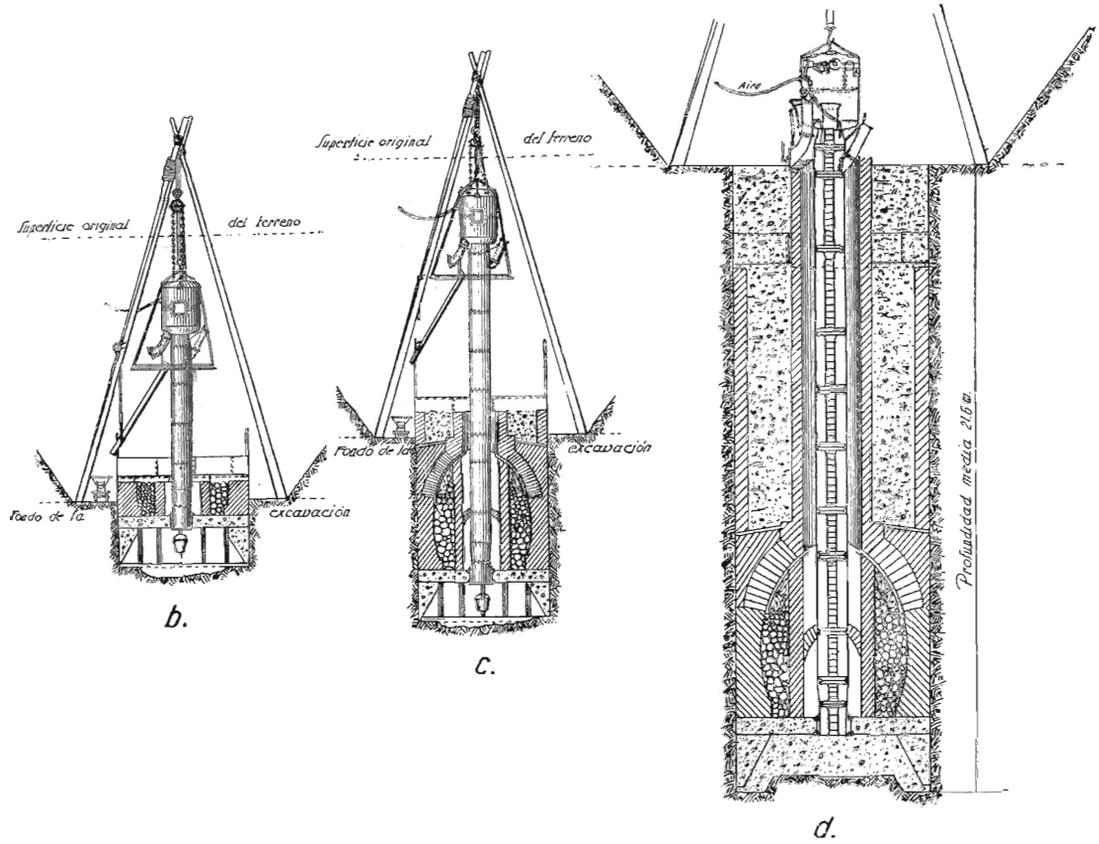


Figura 267.

236. Sistemas de consolidación del terreno.— Desde hace muchos años se ha tenido la idea de consolidar el terreno por congelación, antes de proceder a la excavación; por primera vez se empleó este sistema en 1884, en Estocolmo, para construir un pequeño túnel para peatones a través de un terreno fúido de arcilla y arena; la congelación se obtenía llenando, por la noche, el espacio a excavar al día siguiente con aire a -52° ; el método resultó lentísimo y muy caro. En París se empleó también sin resultado, para el túnel de paso bajo el Sena, de la línea IV del Metropolitano. En el Metropolitano de Moscú también se ha utilizado, para la construcción de los pozos de bajada, que tenían que atravesar capas

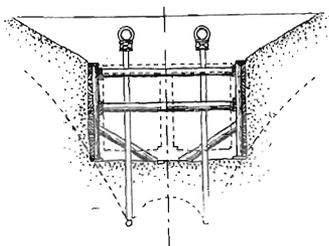


Figura 268.

poco coherentes con gran cantidad de agua.

Últimamente se ha realizado la consolidación por congelación, empleando líquidos que al vaporizarse producen una baja temperatura, anhídrido sulfuroso, amoníaco, etc.; el sistema tiene un grave inconveniente para emplearlo en excavación de túneles: los gases, muy venenosos, hacen imposible la permanencia del personal, durante bastante tiempo, en la zona tratada; por ello se emplea este sistema, preferentemente, para la excavación a cielo abierto.

237. Excavación en trincheras a cielo abierto.— Cuando conviene construir el túnel a cielo abierto y en terreno que contenga gran cantidad de agua, se recurre a rebajar la capa acuosa, utilizando tubos perforados que se colocan a lo largo de la excavación y, por los cuales, se extrae el agua con bombas (fig. 268). Este procedimiento se ha empleado

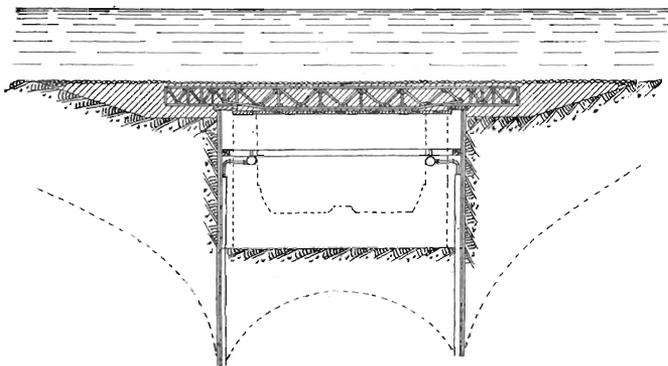


Fig. 269. — Cruce del Metropolitano de Berlín, bajo el Spree.

en la construcción del Metropolitano de Berlín, en las proximidades de Spree, y para atravesar este río, con la disposición de la figura 269.

238. Procedimientos especiales para la construcción de túneles bajo el agua. — Puede emplearse el procedimiento de construir fuera la estructura del túnel, en tramos de la conveniente longitud, que luego se hincan en el terreno, empleando aire comprimido; así se ha hecho, por ejemplo, para atravesar el Sena con la línea IV del Metropolitano de París (fig. 270). Cada elemento llevaba sus paredes extremas cerradas por muros de 1,75 m.; asentado un elemento sobre el fondo del río, se

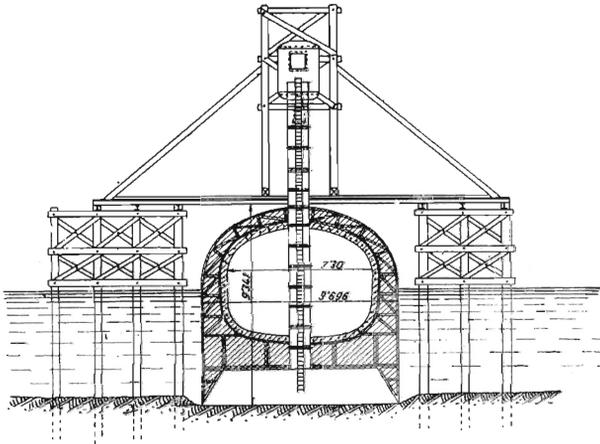


Fig. 270. — Construcción del paso bajo el Sena (París).

hacía descender lentamente, por el procedimiento corriente de hincas de cajones de aire comprimido; las juntas entre elementos se realizaron también con el auxilio del aire comprimido, en la forma que puede verse en la figura 271; los cajones tenían una longitud variable de 20 a 43 m. Ejemplos de construcciones similares son varios túneles, entre ellos, los más notables, el que une a Oakland y Alameda, bajo el estuario que existe entre ambas, y el túnel de doble vía bajo el río Detroit, entre Windsor y Detroit, y bajo el Sena en París. En todos, la estructura del túnel fué construída fuera, y llevada, flotando, hasta su sitio de colocación (fig. 272); éste había sido previamente preparado, realizando la excavación de una zanja, a cuyo fondo se le dió la resistencia precisa mediante pilotes, y una solera de hormigón armado (túnel bajo el Sena) (fig. 273), o bien con pilotes, hormigón y lecho de arena (túnel de Oakland) (figura 274).

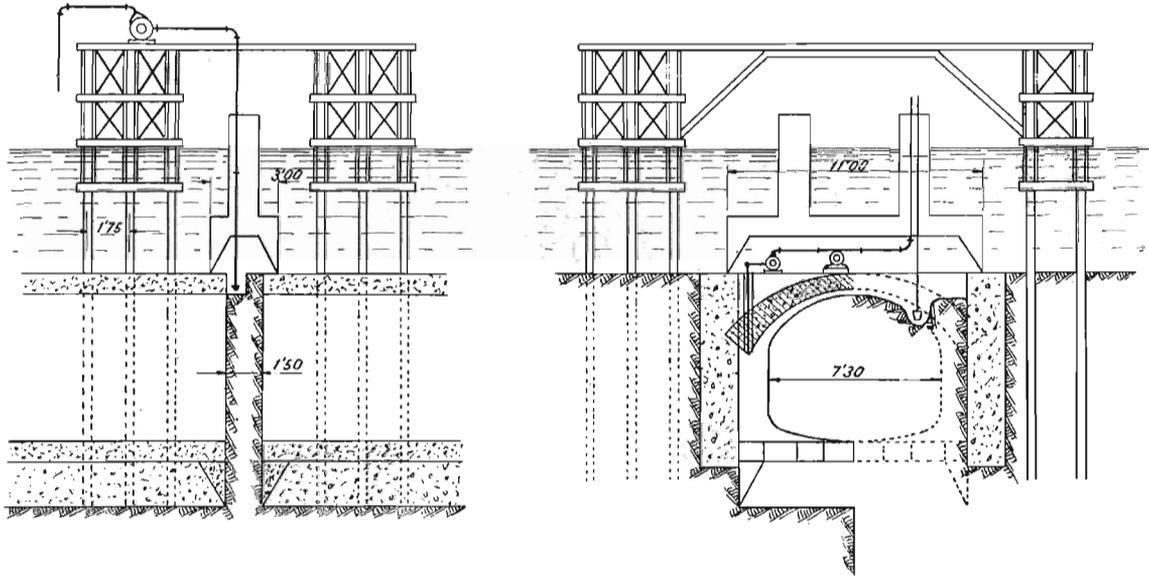


Fig. 271.— Unión de dos cajones. Paso bajo el Sena (París).

239. Coste de túneles.—Un túnel, cuando tiene longitud importante, es obra en la cual los imprevistos pueden hacer variar mucho su valor final: porque se altere el de ejecución material de la obra en sí y porque se alargue el plazo de ejecución calculado. La naturaleza del terreno, en túneles de longitud considerable, es muy difícil de prever; el informe geológico no puede ser nunca lo suficientemente riguroso para que sea posible presupuestar, *a priori* exactamente, las dificultades que se encontrarán en la construcción; la naturaleza del terreno, en muchos casos,

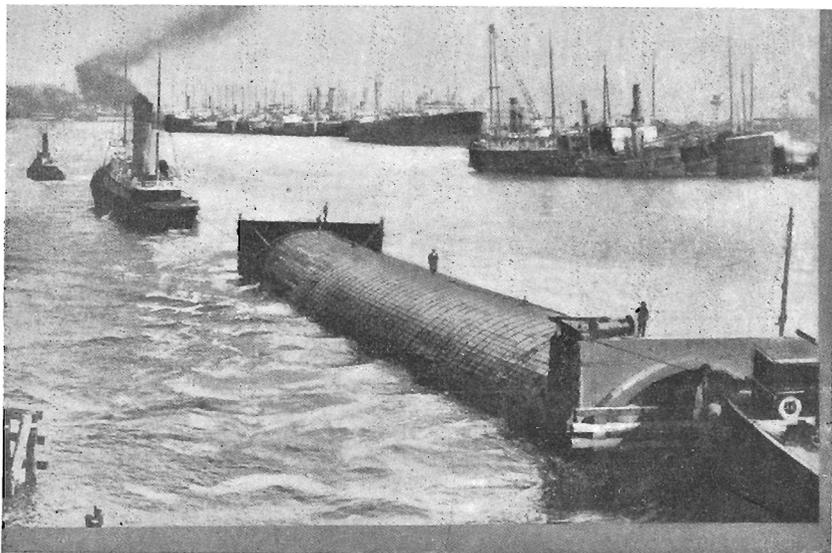


Fig. 272. — Túnel de Oakland: transporte de la sección.

y la presencia de caudales importantes de agua, pueden aumentar considerablemente el importe definitivo. Una obra no debe contratarse a base de que el adjudicatario corra con todos los riesgos imprevistos; porque el contrato es de prestación de un servicio, que debe pagarse a su justo precio; y si éste no se abona, el constructor deberá cubrir el riesgo, con un margen grande, la mayoría de las veces exagerado. Para evitar estos inconvenientes en los presupuestos de túneles, se debe calcular la obra en condiciones normales y cargar al importe total un tanto por ciento que cubra las eventuales dificultades que se puedan presentar. Normalmente, en un túnel de longitud no mayor de 2 Km., en terreno conocido, donde la construcción sea fácil, los imprevistos pueden valorarse en un 10 a un 15 por 100 del presupuesto de ejecución material; en túne-

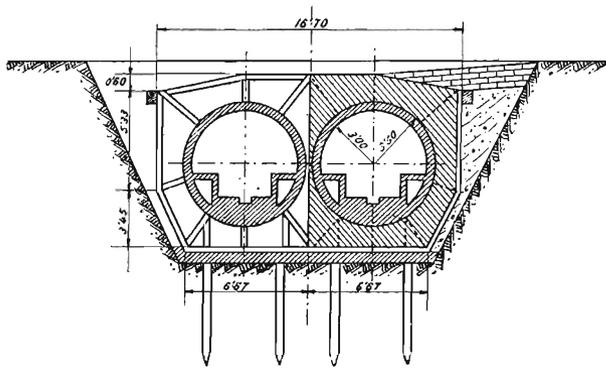


Fig. 273. — Túnel bajo el Sena (París).

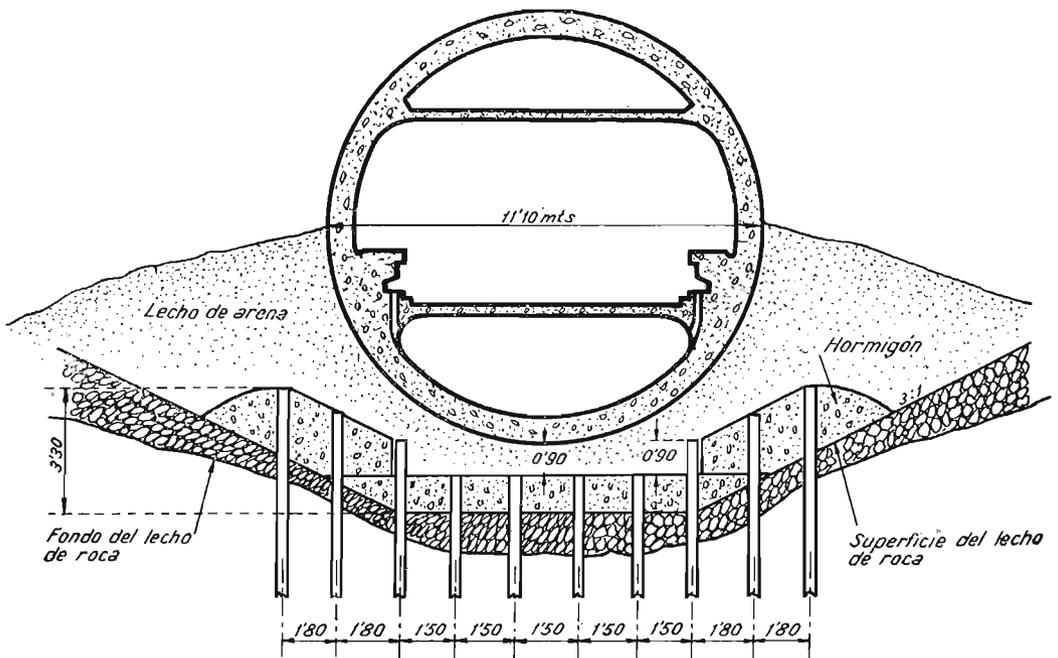


Fig. 274. — Túnel de Oakland.

les de gran longitud, aun en condiciones normales, la partida de imprevistos suele ascender, como mínimo, al 25 por 100.

La valoración del precio unitario de la excavación dependerá, no solamente de la naturaleza del terreno en sí, sino de las dimensiones de la obra; por ejemplo, si el terreno es roca compacta, el precio unitario del metro cúbico de excavación será mayor, en el caso de que se trate de una galería de pequeña sección, que cuando se trate de una galería de sección grande. En cambio, si se trata de terreno incoherente, que produzca grandes empujes, el precio unitario del metro cúbico de excavación será mayor para la sección grande que para la pequeña. Generalmente, para tener en cuenta el aumento de la mano de obra de excavación, el incremento de longitud de transporte y su precio unitario, se establecen diferentes precios, según las distancias a la boca del túnel, o punto de ataque que se utilice, para la extracción de escombros.

En el cálculo del precio unitario del metro cúbico de excavación, deberá tenerse en cuenta, sin abono suplementario, la presencia de una cantidad determinada de agua; por ejemplo, se puede considerar que la excavación es normal, mientras el caudal de agua no sea superior a 2 litros por segundo; si el caudal excede de 2 litros, sin llegar, por ejemplo, a 10 litros por segundo, se debe prever un aumento de precio, en el calculado para la excavación; si excediese de 10 litros, sin llegar a 100, se deberá prever un nuevo aumento; para grandes cantidades de agua, superiores a la cifra indicada, debe estipularse la realización de la obra por administración. Aunque raramente se presentan fenómenos de manantiales termales o gases nocivos que hagan el trabajo mucho más difícil que lo previsto, se debe prever en el pliego de condiciones y presupuesto la indemnización o forma de abonar los perjuicios que por esta causa se originen. En resumen: el ingeniero debe estudiar un precio de excavación en condiciones normales, con los márgenes de imprevistos antes indicados y estipular la forma y cuantía de abonar los imprevistos excepcionales, seguro de que, el disminuir los riesgos de la contrata, no sólo es justo, sino la mayoría de las veces económico.

Para formular los precios de las distintas unidades de obra, habrá que determinar:

1.º Precio de los materiales y mano de obra empleados; para ello, se tendrá en cuenta:

- a) Los precios de los materiales en la boca del túnel.
- b) Su transporte al punto de trabajo.
- c) Las horas empleadas en la excavación por las distintas categorías de trabajadores.
- d) El consumo, en su caso, de explosivos, mecha y detonadores.

e) El material empleado en la entibación, teniendo en cuenta el número de veces que sea posible utilizarlo y su valor residuo.

2.º Coste de las instalaciones :

a) De excavación, compresores, tuberías, martillos, etc.

b) De los medios de transporte: vía, vagonetas, etc.

c) De las instalaciones auxiliares que fueran precisas; ventilación, iluminación, campamentos, etc.

En esta partida se tendrán en cuenta los gastos de transporte hasta obra de los medios a emplear, su montaje y desmontaje, así como los de reparación, sostenimiento y amortización correspondiente de las instalaciones.

3.º Los gastos generales de la obra, dirección, oficinas centrales, etc.

La partida 3.ª, y en menor proporción la 2.ª, se ven afectadas por la duración de la obra; en condiciones normales, puede considerarse para túnel de vía sencilla como avance medio diario, en veinticuatro horas :

Roca blanda (margas)	9 m.
" de dureza media (calizas y dolomias).	7 "
Rocas duras (areniscas)	6 "
" durísimas (gneis o granito)	4 "
Terrenos incoherentes secos.....	3 "
Terrenos fluidos con grandes empujes	2 a 0,50 m.

Estudiando cuidadosamente las características técnicas de la obra, se deberá formular con todo detalle un plan de trabajo, que dará unas necesidades de maquinaria y material auxiliar, del cual se deduce la partida de amortización correspondiente y los precios unitarios de excavación y revestimiento, que permitirán formular el presupuesto de ejecución material. A la cifra que resulte deberán añadirse los tantos por ciento de imprevistos antes fijados y los normales en todo proyecto.
