

PARTE TERCERA
T Ú N E L E S

CAPÍTULO XII

Túneles.

Cuando, al proyectar un camino, se encuentra un macizo montañoso, puede ser más económico que pasar por el puerto, perforar la montaña con un túnel, logrando una importante reducción de la longitud a recorrer. La primera razón de existencia de un túnel es acortar el trazado y obtener una economía en la construcción o explotación de la vía. Hay otros casos en los cuales se podría ejecutar el trazado en trinchera, pero con grandes cotas de desmonte, antieconómicas de construcción, difíciles y peligrosas de conservación; entonces, el tramo de grandes cotas de desmonte, se realiza en túnel, más económico por metro lineal de camino. El trazado de vías rápidas urbanas — metropolitanos — exige la construcción subterránea para evitar la ocupación de una parte de la superficie de la calzada y asegurar, sin peligro para el tránsito, una velocidad comercial conveniente del ferrocarril. Por último, hay casos en los cuales el cruce de caminos ordinarios con grandes vías se hace por debajo del agua, para dejar por su superficie el paso libre a la navegación y asegurar la continuidad de circulación de la vía. Se realizan también galerías para conducción de aguas potables o usadas, o para alojar los servicios urbanos de luz, teléfono, agua, etc.

Desde la más remota antigüedad, el hombre trabajó para abrirse paso por el interior de la tierra: las galerías del Alto Egipto y de la India, para dar acceso a los templos y las tumbas, son los más primitivos vestigios que existen de trabajos de esta clase. Hay que detenerse con admiración, al considerar las tremendas dificultades que aquellos hombres tenían que vencer; toda la herramienta era manual, y se recurría, para la excavación en roca, al ingenioso sistema del fuego, que consistía en calentar la roca, haciendo arder leña junto a ella, y luego enfriarla rápidamente con agua, para producir su agrietamiento y hacer más fácil la excavación.

Los romanos construyeron un gran número de alcantarillas, algu-

nas de considerables dimensiones. Las catacumbas, que los primeros cristianos ejecutaron para poder en ellas practicar nuestra Fe, son hoy admiración del visitante de Roma. Se construyeron también gran número de túneles para conducir agua con destino al abastecimiento o el riego; el más importante fué la galería del lago Fucino, destinada a aprovechar sus aguas para el riego; esta obra, realizada en tiempo del emperador Claudio, tiene una longitud de 5.635 metros; para ejecutarla, se abrieron 40 pozos, duró once años y en ella fueron empleados 30.000 hombres.

Nada importante se hizo durante la Edad Media, ni en los primeros siglos de la Moderna. En los comienzos del XVIII, la posibilidad de utilizar la pólvora, como auxiliar de la excavación, fué sancionada por la experiencia.

A principios del siglo XIX, Napoleón, para la carretera del Simplón, construyó seis túneles, el más largo de ellos de 200 metros de longitud. En 1798, se inició el estudio del túnel bajo el Támesis, que tuvo que ser abandonado en su iniciación (1800); se reanudaron los trabajos en 1825, y en 1843 fueron terminados, bajo la dirección del Ingeniero BRUNNEL; el túnel está formado por dos galerías paralelas, de 4,20 y 4,80 metros de diámetro; ocurrieron durante su construcción gran número de accidentes, que costaron bastantes vidas y sumas importantes de dinero. Se invirtieron en la obra 31.968 libras esterlinas por metro lineal de la doble galería; este túnel sigue hoy en servicio.

La aparición del ferrocarril, con pendientes máximas mucho más reducidas y radios mayores que las del camino ordinario, hizo imprescindible, para algunos recorridos, la construcción de grandes túneles. El primer túnel de gran longitud que se construyó, fué el de Mont Cenis, o Cenisio, de los italianos, en la línea férrea que había de unir Francia e Italia. Tiene en total una longitud de 12.220 metros, de los cuales 6.790 están en territorio italiano y el resto en francés; está construído para doble vía, con una cota media de 1.300 metros y una máxima de 1.600; en su realización se tardó trece años, siendo inaugurado el 12 de septiembre de 1871. Los trabajos de perforación de este túnel se iniciaron a mano; pero durante su ejecución se empleó, por primera vez, la perforación con aire comprimido y, gracias a ella, los trabajos pudieron ser terminados en un plazo relativamente reducido; su coste total fué de 70 millones de liras, en vez de los 38 millones a que ascendía el presupuesto del proyecto.

El túnel de San Gotardo se inició poco tiempo después, en 1872, con el fin de unir Italia con Suiza; tiene una longitud casi de 15 kilómetros y una altura máxima de tierra de 1.140 metros; está construído

para doble vía. Fué interesante, en los trabajos de este túnel, la exactitud del replanteo; atacado por dos bocas, se encontraron a 7.744 metros de la boca Norte, con un error lateral de 33 centímetros y 5 centímetros de nivel. Los trabajos se terminaron en el año 1880, o sea a los siete años y medio de comenzados.

A fines del siglo, el 13 de noviembre de 1898, comenzaron los trabajos del túnel del Simplón, hasta hoy el mayor del mundo, con una longitud de cerca de 20 kilómetros, trazado entre Italia y Suiza; tiene una cota máxima de 2.146 metros y está constituido por dos galerías, unidas cada 200 metros. La principal dificultad con que se tropezó fué la gran cantidad de manantiales, 237, que llegaron a producir un caudal de más de 100.000 metros cúbicos diarios, con temperaturas variables entre los 10° y los 52° C. El avance mensual medio fué de 247 metros, alcanzándose esta cifra indudablemente por el acierto de proyectar dos galerías paralelas, con lo que se redujeron, en gran proporción, las dificultades de construcción. La obra se terminó el 6 de julio de 1905.

Recientemente, se ha terminado el túnel de los Apeninos, en la línea Milán-Bolonia-Roma; tiene una longitud de 18.500 metros; las principales dificultades encontradas fueron debidas a las arcillas de estructura laminar, que originaron enormes empujes, obligando a un sistema especial de trabajo.

Aparte de estos túneles, los más importantes del mundo, merecen citarse el túnel de Loetchberg, entre Italia y Suiza (14.536 metros); el de Moffat (9.600 metros), en los Estados Unidos, y el de Tanna, en el Japón, donde hubo que luchar con enormes caudales de agua.

En España, el primer túnel importante fué el de la Argentera, de 4.043,75 metros, obra del Ingeniero de Caminos D. EDUARDO MARISTANY, Marqués de Argentera; está situado en la línea del ferrocarril de Madrid a Barcelona, en Argentera, provincia de Tarragona. El de Canfranc, entre España y Francia, en la provincia de Huesca, tiene una longitud de 8,5 kilómetros; su sección es para vía única, ancho europeo. Actualmente se encuentra en ejecución el de Padarnelo, en el ferrocarril de Zamora a Coruña, con una longitud de 5.949,15 metros.

Túneles importantes bajo grandes ríos, el del Támesis, en Londres, el primero en su clase, y los del Hudson, en Nueva York; el del Escalda, en Amberes, el de Hamburgo y el de Liverpool.

En las antiguas carreteras, los túneles a través de grandes macizos eran raros y generalmente de pequeña longitud, como los túneles del Simplón, construidos a principios del siglo pasado por orden de Napoleón I; hoy día, la necesidad de adaptar el trazado de los modernos caminos ordinarios a grandes velocidades específicas, ha obligado a re-

currir al empleo frecuente de túneles; en Norteamérica, en Italia y en Alemania, las modernas autoestradas tienen túneles que alcanzan, en algunos casos, longitudes importantes; las características del tráfico que han de servir, plantea, no en su construcción — similar a la de túneles para ferrocarril —, sino en su explotación, problemas nuevos y de importancia, cuando el tráfico es considerable.

En Norteamérica existen más de 30 túneles para caminos ordinarios, la mayoría de ellos de pequeña longitud, de 100 a 250 metros; los mayores son el de Utah, en el "East Rim Road", con 1.720 metros (terminado en el año 1936); el del Parque Nacional de Yosemite, en California (1933), y los de Oakland, con 977 y 956 metros (1937).

En España el túnel de Viella, que comunica con el resto de la Península el valle de Arán, recientemente perforado, con más de cuatro kilómetros de longitud, es la obra más importante hasta ahora realizada, para caminos ordinarios.

187. Condiciones del trazado en planta. — El trazado de un túnel en planta está subordinado a la situación de las dos bocas. Generalmente, es una recta, pues no suele haber razón para unir los dos puntos por alineaciones curvas; no obstante, en algunos casos, puede ser preciso intercalar curvas, para ajustar la planta al paso por puntos determinados, por razones de construcción, por ejemplo, situación de pozos de ataque; otras veces, es necesario, por causas geológicas, separarse de zonas determinadas, donde el estudio del terreno hace prever dificultades de construcción. Algunas veces, las dos bocas del túnel están situadas con una gran diferencia de nivel, que se gana, por desarrollo del túnel, que se proyecta con planta curva helicoidal; por ejemplo: en la subida del puerto de Pajares, en España (fig. 178), y los túneles del valle del Ticino, en Italia, entre Giornico y Airolo (fig. 179). En el caso de planta recta, con entrada en curva, para mayor facilidad de replanteo, se prolonga el túnel por unas pequeñas rectas, llamadas falsa embocadura; así se ha hecho en la boca Sur del Simplón y en el San Gotardo.

188. Trazado en perfil. — En el trazado en perfil de un túnel será preciso tener en cuenta: *a)* La pendiente máxima, para no exceder de la que permite el esfuerzo de tracción. *b)* La necesidad de evacuar las aguas, que el túnel produzca durante la construcción y explotación. *c)* La posibilidad de ventilación.

a) Máxima pendiente admisible: Vimos, al tratar de la máxima pendiente admisible en ferrocarriles, que en los túneles debía ser menor que a cielo abierto, pues el coeficiente de rozamiento sufre una dismi-

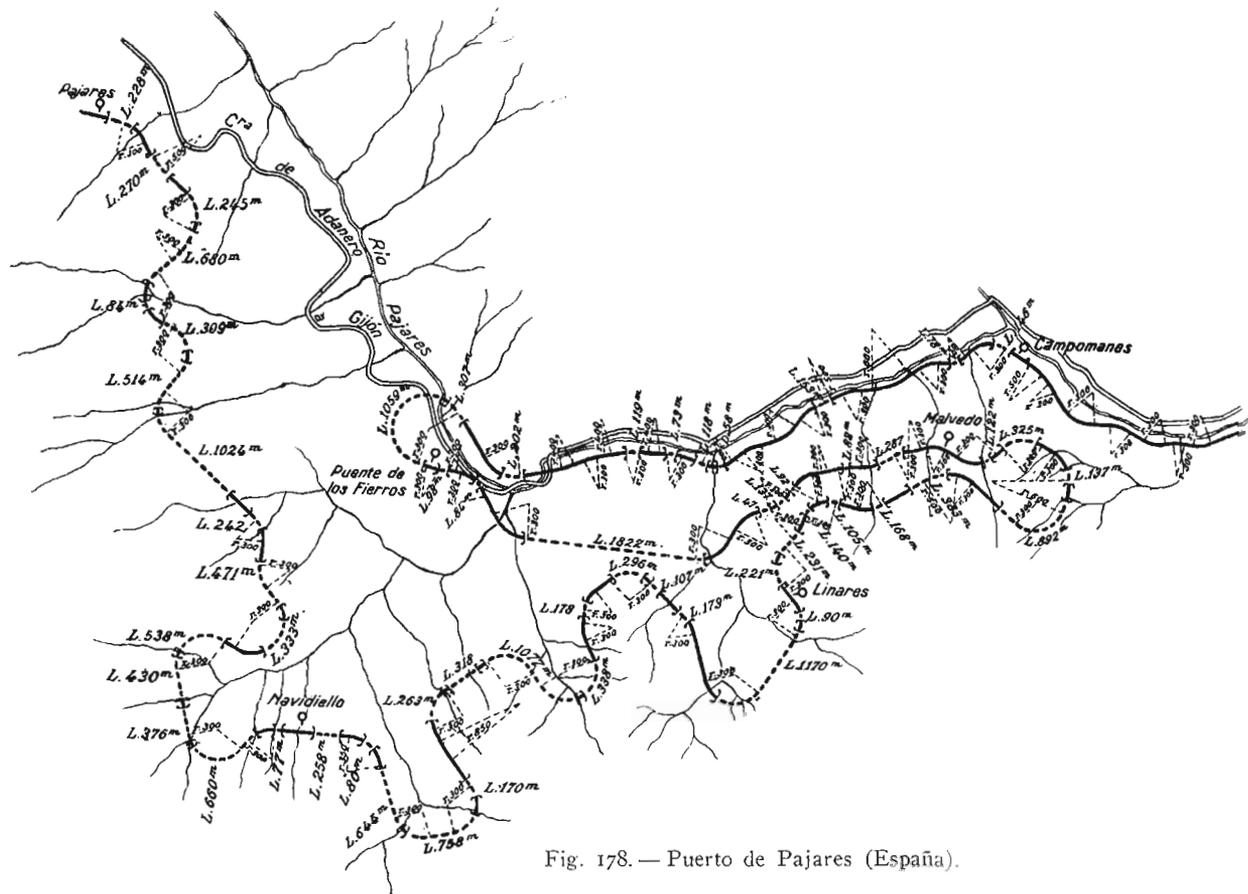


Fig. 178. — Puerto de Pajares (España).

nución a causa de la humedad del ambiente, que, unida al polvo del carbón de la locomotora, actúa como una especie de lubricante; por otra parte, la resistencia del aire dentro del túnel es también mayor que fuera de él; por ello, el coeficiente de rozamiento se ve afectado por uno de reducción, que oscila entre el 0,70 y el 0,90, según las condiciones de ventilación del túnel; como el aumento de resistencia se presenta bruscamente a la entrada del túnel, es conveniente, si no puede reducirse la pendiente de todo él, que es lo recomendable, por lo menos hacerlo en un pequeño tramo a la entrada.

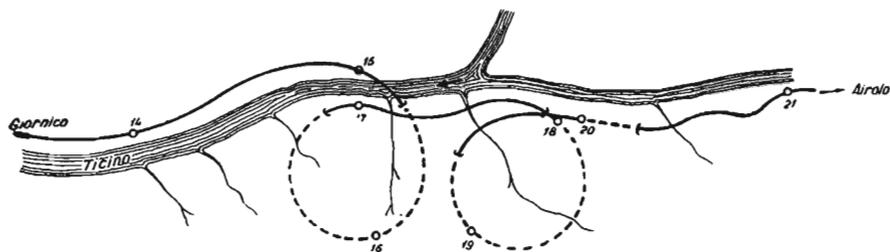


Fig. 179. — Túneles helicoidales del Ticino (Italia).

b) Necesidad de evacuación de las aguas del túnel: Para ser eliminadas las aguas del túnel por gravedad, es preciso una pendiente, como mínimo, de tres milímetros por metro; si se ha de atacar por las dos bocas, la forma conveniente de su perfil será la de la figura 180; se podrá entonces, por gravedad, eliminar las aguas de las dos mitades



Figura 180.

del túnel; si se ha de atacar por las dos bocas y su rasante ser una, habrá que disponer una cuneta o tubería de evacuación de las aguas, para los trabajos de la boca más alta, que tendrá pendiente en sentido contrario a la del túnel; en la mayoría de los casos, para dar salida a las aguas, habrá que elevarlas.

En los metropolitanos, trazados a profundidades muy inferiores a los túneles ordinarios, en general la rasante del trazado, sigue el sentido de la pendiente de la superficie; normalmente, la pendiente no debe exceder del 4 por 100; sólo en casos excepcionales se llegará al 5 por 100; en los puntos bajos del trazado se disponen pozos de recogida

de las aguas, desde los cuales, si es posible directamente, y, si no lo fuese, con bombas, se llevarán al alcantarillado.

c) Posibilidad de ventilación: Para que pueda existir la ventilación natural es, generalmente, preciso que las dos bocas se encuentren a diferente nivel; entonces, especialmente en túneles de doble vía, la ventilación natural durante la explotación es suficiente; a ello ayudan dos factores: la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior y la corriente producida por el movimiento de los trenes. Al tratar de la explotación de los túneles, nos ocuparemos de este importante extremo, especialmente interesante en los túneles para caminos ordinarios de gran circulación.

Las condiciones b) y c) imponen formas de perfil contrarias; en túneles con dos pendientes, dirigidas hacia las bocas, la condición de la ventilación natural se puede lograr, si las características del terreno lo hacen económicamente posible, estableciendo un pozo en el punto alto de la rasante; si no es posible, será necesario, en algunos casos, establecer la ventilación forzada. Si se busca, con rasante única, la ventilación natural, será preciso, tal vez, establecer la evacuación forzosa de las aguas, si el túnel se ataca por las dos bocas. El estudio, en cada caso, de la importancia de los problemas que una u otra solución plantea, indicará al ingeniero el camino a seguir.

189. Dimensiones del perfil transversal del túnel. — Las dimensiones de la sección transversal de un túnel para ferrocarril, depende del tamaño del material que ha de servir; en la figura 181 puede verse el gálibo de los ferrocarriles españoles de vía ancha; de él ha de quedar, hasta la sección del túnel, un huelgo mínimo de 0,40 metros, si se trata de vía sencilla, y de 0,30, en vía doble. En el caso de túnel en curva, será preciso un sobreecho, por la desviación del gálibo de la vertical y por la base rígida del material. En la figura 182, fácilmente se deduce que el sobreecho preciso por el peralte es, para vía sencilla:

$$f_1 = H \operatorname{tg} \alpha = H \times \frac{p}{S};$$

en la cual H es la altura del gálibo, p , el peralte, y S , el ancho de la vía; el sobreecho preciso por la base rígida del material, también en vía sencilla, será:

$$f = \frac{l^2}{8 \cdot R};$$

en la cual, l es la longitud de la base rígida del material, y R , el radio de la curva exterior.

¿Debe construirse el perfil transversal del túnel para doble vía, aun cuando el ferrocarril sea de vía sencilla? El problema es, principalmente, de orden económico; para plantearlo y resolverlo en forma adecuada, hay que tener en cuenta que la ampliación de un túnel de vía sencilla a doble vía cuesta mucho más que construirlo directamente para vía doble; esto, sin valorar el gran trastorno que, para el tráfico, representan los trabajos de ampliación de un túnel en servicio, tras-

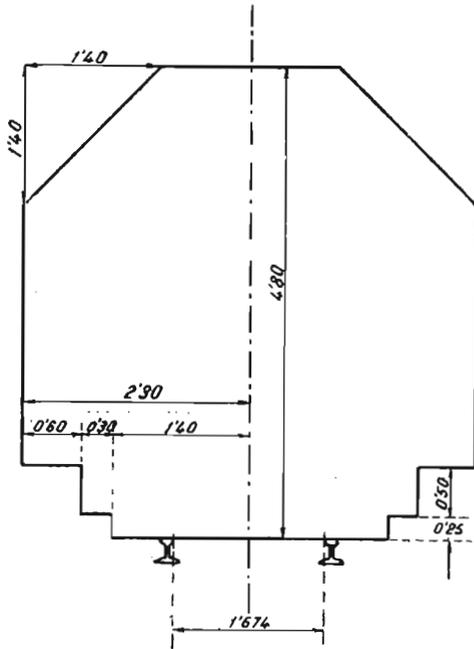


Figura 181.

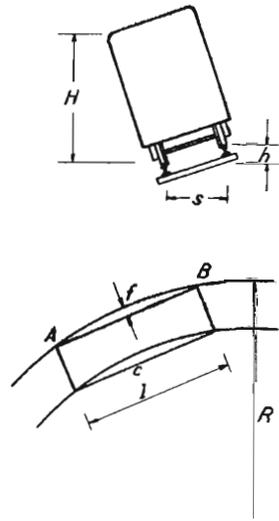


Figura 182.

torno que, en definitiva, se traduce en un aumento del importe de la obra. Si es previsible, en un plazo prudencial, la necesidad de establecer doble vía en un ferrocarril de vía sencilla, habrá que tener en cuenta el verdadero coste de la futura ampliación; en la mayoría de los casos, será conveniente construir desde el principio la sección para doble vía o, por lo menos, será conveniente, como se hizo en San Gotardo, que el túnel quede preparado para la ampliación (fig. 183). Aparte de las consideraciones de coste de la construcción, hay que tener en cuenta que, en túneles largos, el problema de la ventilación con vía sencilla es más difícil de resolver que en el caso de doble vía, y que el aumento de resistencia del aire llega a duplicar la resistencia normal a cielo abierto. En

el Simplón se han medido las siguientes resistencias a tracción, por tonelada de peso del tren, según la velocidad de marcha:

Resistencia a tracción. Kg./Tn.	}	Velocidad Km./h.	50	60	70
		A cielo abierto.....	3,3	4,1	5,0
		En túnel, marchando en el sentido de la ventilación.....	5,0	6,4	8,0
		En túnel, marchando en sentido opuesto a la ventilación.....	7,0	9,7	12,5

La consideración de la ventilación desaparece en el momento que se trate de líneas electrificadas.

En ferrocarriles metropolitanos, el perfil del túnel deberá estar ajustado al material que por él ha de circular, dejando, sobre las dimensiones del gálibo, un suplemento de acuerdo con el criterio expuesto al principio de este epígrafe; a veces, se construyen túneles independientes, a poca distancia, para ambos sentidos de marcha, con frecuente comunicación. Algunas líneas están proyectadas para tres y cuatro circulaciones.

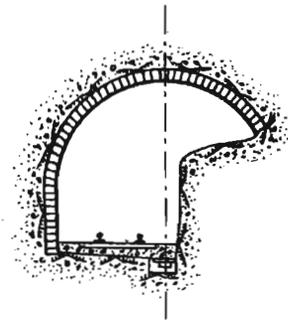


Figura 183.

En las estaciones, el perfil transversal adoptado dependerá del servicio que se proyecte dar en ellas. Las figuras 184 y 185 muestran perfiles transversales tipo, de los metropolitanos de Londres y Madrid.

Los túneles para caminos ordinarios tienen una sección de acuerdo con el tráfico previsto para la vía; como mínimo, 6 metros de calzada, para que puedan cruzar dos circulaciones; con un ancho menor, la ave-

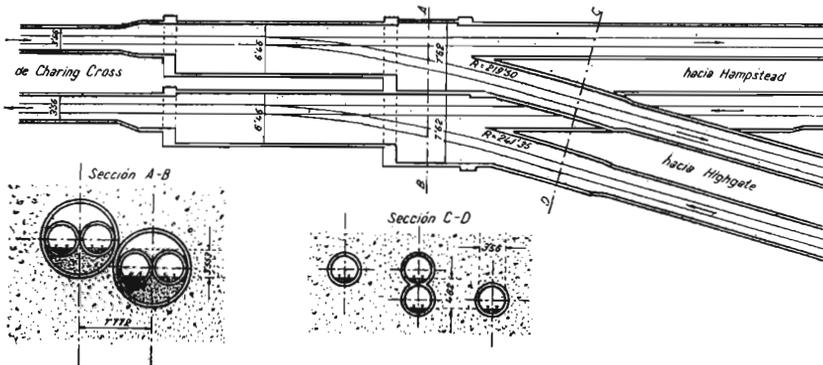


Fig. 184. — Metropolitano de Londres.

ría de un vehículo produciría la detención de todo el tráfico en el túnel; cuando la circulación es muy grande, conviene separar, en túneles independientes, los dos sentidos de circulación; pero, en este caso, como mínimo, se precisan 12 metros de calzada. Para la circulación de peatones,

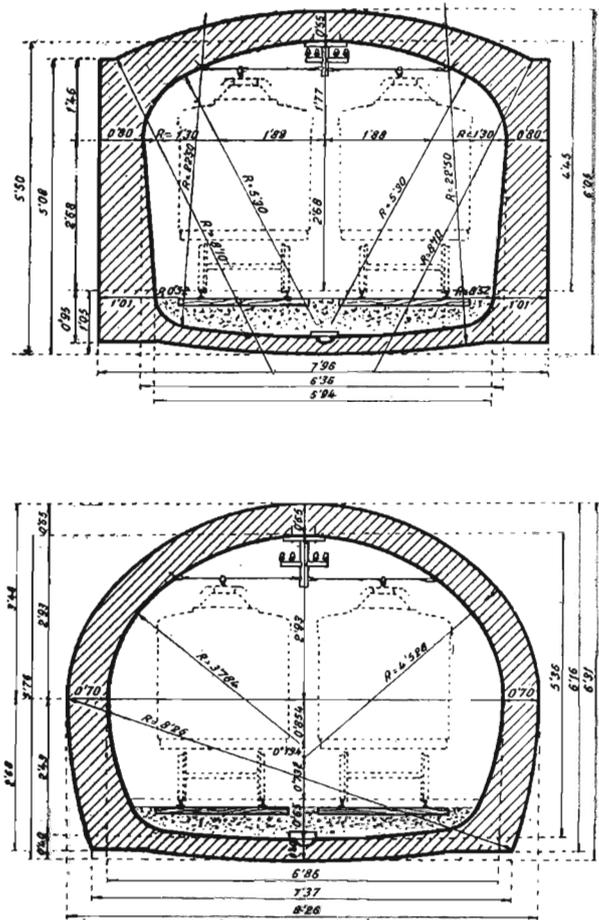


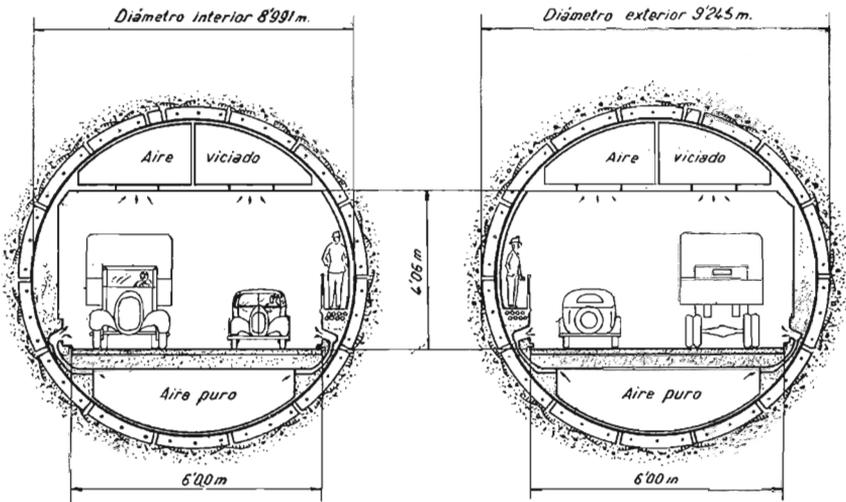
Fig. 185. — Metropolitano de Madrid.

se proyectarán paseos del ancho preciso, según las características de la vía. En las figuras 186 y 187 pueden verse los perfiles transversales de los túneles de Holland, en Estados Unidos, y del Viella, en España.

Determinada la sección libre precisa por las consideraciones del tráfico, hay que fijar la forma más conveniente de la excavación y su revesti-

miento, y en ello influyen, muy fundamentalmente, las características del terreno. Como veremos al estudiar el cálculo de resistencia de la sección, alrededor de la excavación generalmente se disgrega una masa de terreno que pierde, al menos en parte importante, su cohesión; esta masa, cuyo volumen depende de la naturaleza del material, es la que carga sobre el revestimiento del túnel.

En la práctica, cuando se trata de terrenos resistentes donde los empujes laterales son nulos y solamente cabe tener en cuenta los verticales, se adopta como sección una semielipse, cuyo eje mayor será vertical;



Sección normal del Holland-túnel

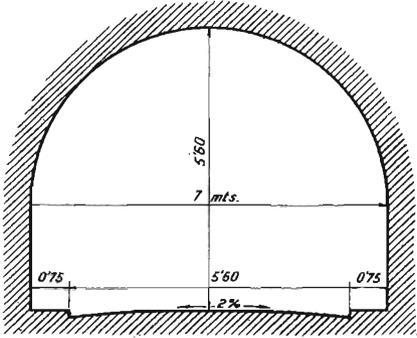
Figura 186.

cuando el terreno empuje lateralmente, será preciso reforzar el espesor de los muros, y cuando la plasticidad del terreno obligue a considerar los empujes de abajo a arriba, será necesario proyectar una bóveda invertida en el fondo de la excavación —la contrabóveda—, que sea capaz de absorberlos; cuando el terreno aumente de plasticidad, se llegará a construir un perfil policéntrico continuo y, en fin, en el caso de terreno flúido, se adoptará la forma circular. La naturaleza del terreno en zonas determinadas donde existan empujes inclinados, obligará en algunos casos a proyectar secciones disimétricas (fig. 188).

Cuando el túnel es de longitud importante, pueden ser precisas secciones diferentes, por razón de la resistencia, aunque el gálibo permanezca invariable.

En el caso de metropolitanos, la necesidad de salvar otros servicios,

grandes alcantarillas, conducciones de agua, etc., o bien el trazado a poca profundidad, obliga a cambiar la forma constructivamente recomendable; por esto, son corrientes las secciones rectangulares (fig. 189); en ellas



Sección del túnel de Viella.

Figura 187.

la cubierta está formada, en muchos casos, por vigas metálicas embebidas en hormigón o estructuras de hormigón armado.

Antes de adoptar un tipo de sección transversal, conviene estudiar

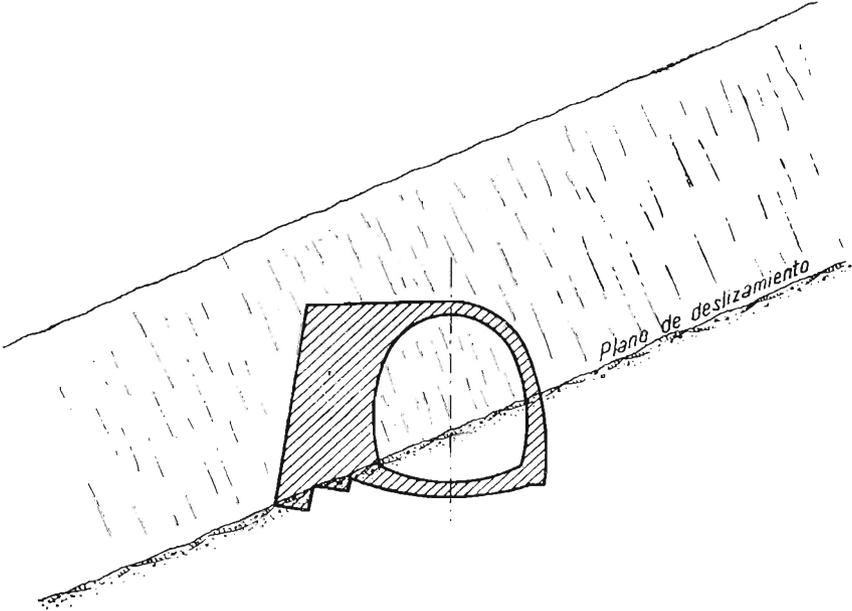


Figura 188.

son las densidades del agua y terreno respectivamente, la carga en un punto de profundidad, y , bajo la arena, será (fig. 190, b):

$$p_a h + p_t y = p_t \left(y + \frac{p_a}{p_t} h \right).$$

En el caso de un terreno de cierta cohesión, el problema varía; al abrir en él una galería, no toda la masa que existe hasta la superficie libre actúa, como al principio se creía, de acuerdo con las teorías de CULMANN; si esto fuese así, no hubiera sido posible construir galerías a grandes profundidades; 2.000 m. de altura hubieran representado cargas enormes,

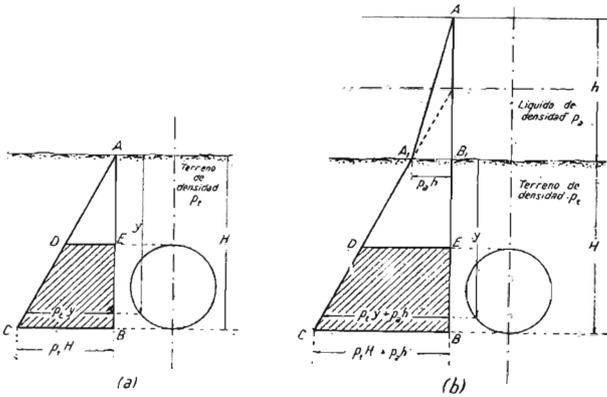


Figura 190.

que, prácticamente, no podrían resistir los revestimientos; solamente actúa una zona limitada de terreno que, al perder su cohesión, carga sobre la galería; la sección del sólido activo tiene forma aproximada de una elipse, según RITTER, o una parábola, según otros autores; en la práctica, y para el grado de aproximación que es posible obtener, ambas curvas coinciden. La altura de la curva de empuje activo es, según RITTER,

$$h = \frac{b^2}{16 u};$$

en la cual, b es el eje menor de la elipse, y u es la relación entre la cohesión del terreno y su peso específico, o sea $u = \frac{c}{p_t}$; los valores corrientes de u , son:

Tierra vegetal, compacta y seca.....	$u = 0,32$
" " con humedad natural.....	$u = 0,31$
" arcillosa	$u = 0,55$
Arcilla con arena y humedad natural.....	$u = 0,51$

Si admitimos, de acuerdo con KOMMERELL, que, para grandes profundidades, el plano de rotura es el plano bisector del de talud natural y el plano vertical, la dimensión, b , del eje menor (fig. 191), será:

$$b = \frac{l}{2} + A \cotg \frac{90 + \rho}{2}$$

Cuando los empujes del terreno son grandes, existe una reacción de abajo a arriba en el fondo de la excavación, que es preciso absorber; además, el empuje sobre los estribos del túnel, muy fuerte, obliga a unir-

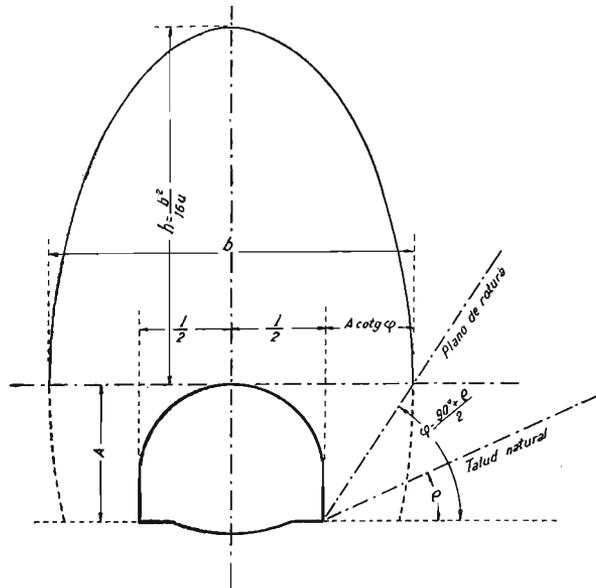


Figura 191.

los por su pie, con una estructura resistente, la contrabóveda, que haga que la curva de presiones del conjunto de la estructura caiga siempre dentro del núcleo central; el empuje de abajo a arriba, para el cual hay que calcular la contrabóveda, es el de la bóveda, disminuido en una cierta proporción y repartido como carga uniforme.

En la práctica, la falta de homogeneidad del terreno, cuando se trata de espesores considerables, hace inexacta la determinación de h , dimensión del semieje mayor, a base del coeficiente u ; es más conveniente ir midiendo, durante la construcción, la presión efectiva, p , ejercida efectivamente por el terreno y determinar la altura, h , por la relación $h = \frac{p}{\rho_1}$,

siendo p_t el peso específico del terreno; como el ángulo de talud natural del terreno se conoce, se determina el eje menor del prisma de carga, en la forma antes indicada. La determinación directa de las presiones ejercidas por el terreno se hace midiendo los esfuerzos originados en los elementos de entibación. Hay que tener en cuenta que la madera de entibación pierde resistencia con gran rapidez; en la galería de Ronco, por ejemplo, según STABILINI, la madera de roble bajó de 530 Kg./cm.² a 230 Kg./cm.² para la rotura a flexión, y de 250/300 Kg./cm.² a 130/235 Kg./cm.² a compresión, y la madera de pino, de 550 a 290 Kg./cm.² para la flexión y de 220/230 a 110/125 Kg./cm.² a compresión.

191. Terrenos homogéneos y coherentes. — Es idea corriente, que la roca sana y consistente no produce empujes, y, por tanto, no precisa revestimiento; y no es exacto, como se ha demostrado en todos los túneles practicados a gran profundidad; la roca compacta produce sobre las paredes de una galería excavada en ella fuertes empujes, que es preciso tener en cuenta.

La primera explicación de este fenómeno es debida a HEIM, que, en su *Mecánica de la Montaña*, dice: “Los empujes de la montaña no son otra cosa que el efecto producido por la gravitación de la masa que la constituye. La presión del terreno actúa en todos sentidos (hidrostáticamente). La masa del terreno, que es heterogénea, produce, por tanto, una distribución desigual de sollicitaciones. En general, no obstante, las sollicitaciones aumentan proporcionalmente a la profundidad. La diferencia entre los esfuerzos producidos en el subsuelo y la presión hidrostática pura, consiste únicamente en el hecho de que en el terreno, más o menos sólido, las alteraciones de equilibrio deben alcanzar un grado considerable para producir el movimiento de una partícula, y los subsiguientes movimientos de asiento no se manifiestan más que muy lentamente, puesto que deben superar, en el curso de su recorrido, las resistencias de rozamiento y cohesión; tienen que vencer un considerable trabajo mecánico”.

“Cuanto más profunda sea la excavación, con más intensidad la masa que la circunda intentará penetrar en ella, puesto que a lo largo de su superficie fué destruída toda resistencia pasiva”.

La roca, al llegar a una cierta carga, se rompe por compresión; cuando la altura de la roca crece, por su propio peso, puede llegarse a la rotura del material; supongamos una roca que pese 2.400 Kg./m.³ y que tenga una resistencia a la rotura de 1.200 Kg./cm.²; una columna que tuviese una altura de $\frac{12 \times 10^6}{2.400} = 5.000$ m. se rompería por la acción de

su propio peso; ahora bien, la roca, comprimida por todos los lados a esas grandes presiones, adquiere una cierta plasticidad, comportándose como un líquido viscoso, y su presión puede asimilarse, en cierto grado, a una presión hidrostática; la galería, sumergida en este medio, comparable con un líquido, sufre empujes en todas direcciones. Este hecho, perfectamente comprobado experimentalmente, sirve también para explicar la formación, sin rotura, de los pliegues geológicos.

Ahora bien, la práctica ha demostrado que, en galerías de profundidad muy inferior a la precisa para la rotura, aparecen fenómenos plásticos; se registrarán fuertes presiones en todos sentidos, pero con distribución muy diferente de la presión hidrostática.

HEIM explica esta contradicción de su teoría, por la presencia de las fisuras en la roca, que hace que, independientemente de la resistencia del material, exista "otra resistencia de la montaña", que es la que habría que considerar, para la exacta aplicación de su teoría. Esta explicación no parece aceptable, pues en la realidad aparecen los fenómenos plásticos, y en muchos casos se produce la rotura para cargas 1/2 y hasta 1/3 de las teóricas; no es lógico que, simplemente las fisuras del terreno, puedan ser causa de tan considerable disminución de resistencia.

La teoría de la elasticidad puede explicar este hecho, por el conocido fenómeno de la concentración de esfuerzos; un agujero practicado en una placa plana, sometida a esfuerzos de tracción o compresión, produce la distribución de cargas que puede verse en la figura 192; en las proximidades del agujero, la carga unitaria llega a ser tres veces la media producida en la pieza (TIMOSHENKO: *Strength of Materiales*, parte II).

Esta alteración de los esfuerzos medios de trabajo sólo tiene lugar dentro de un círculo concéntrico con el agujero practicado; en un punto a distancia r del centro, su valor viene dado por la fórmula (siempre que el diámetro del agujero sea pequeño en relación con las dimensiones de la placa):

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{2} \left(2 + \frac{d^2}{4r^2} + \frac{3}{16} \times \frac{d^4}{r^4} \right);$$

donde σ_0 es la carga media en la placa; d , el diámetro del agujero, y r , la distancia del centro de éste, a la cual se quiere determinar el valor de σ . El aumento de carga por concentración de esfuerzos llega a alcanzar un

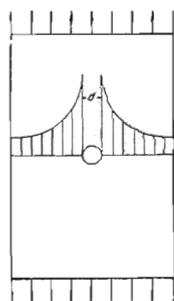


Figura 192.

valor de $3\sigma_0$ en los bordes del agujero, y luego va disminuyendo rápidamente. Es, por tanto, perfectamente lógico que, aunque la altura de la montaña no sea la precisa para producir la rotura del material por carga estática, ésta tenga lugar en la roca que circunda la galería, por concentración de esfuerzos; en el Simplón, por ejemplo, dice el profesor STABILINI, se produjeron cargas muy grandes, con profundidades de 2.000 metros, cargas que no pueden explicarse por la teoría de HEIM; pero si se aplica el razonamiento anterior, la carga en las proximidades de la excavación sería equivalente a una estática de 6.000 metros de altura que, con los datos del ejemplo anterior (peso 2.400 Kg. por metro cúbico), produciría una carga de trabajo de

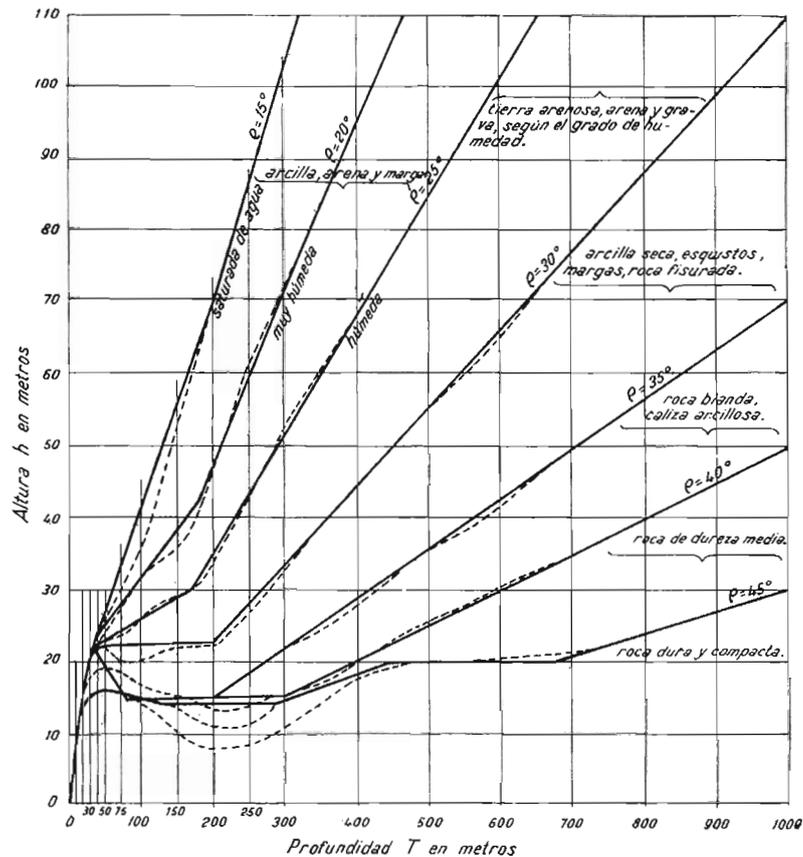
$$\frac{2.400 \times 6.000}{10^4} = 1.440 \text{ Kg./cm.}^2$$

superior, seguramente, a la de rotura del material. Lo expuesto explica también el hecho de que, alrededor del macizo excavado, exista una zona disgregada, causa, como macizo incoherente, de empujes sobre el revestimiento; esta zona disgregada, si el material fuera homogéneo, sería concéntrica con la excavación, si ésta era circular. Se ha observado que en la excavación, al cabo de un cierto tiempo después de practicada, ocurren desprendimientos violentos de pequeños trozos de la roca, especialmente de las paredes, con forma lenticular; fenómeno que tiene lugar con características similares a las que se presentan al romper, en la máquina de compresión, una probeta; se conoce este fenómeno con el nombre de "golpes de la montaña", y no se explica sin tener en cuenta las razones antes expuestas, de concentración de esfuerzos.

Todo ello justifica el fenómeno, cualitativa y cuantitativamente, pero no permite medirlo con exactitud, para que sirva de punto de partida para el cálculo de la sección. En la práctica, la fijación de los esfuerzos sólo se puede hacer midiendo los producidos en la entibación; pueden ser de gran utilidad para el estudio del proyecto los gráficos deducidos por BIERBAUMER, y que se reproducen en las figuras 193, 194 y 195; ellas podrán dar una idea aproximada de las cargas que el revestimiento ha de soportar, que permitirán proyectar sus dimensiones y formular el presupuesto. Luego, en la obra, los revestimientos deberán irse ajustando a los esfuerzos medidos en la realidad. El cálculo del revestimiento, conocidas las fuerzas que sobre él actúan, es un sencillo problema de mecánica aplicada.

192. Causas de alteración de los esfuerzos normales.— No es sólo la posible heterogeneidad del terreno causa de esfuerzos anormales

Diagrama de reducción de altura de carga para túneles de vía sencilla.



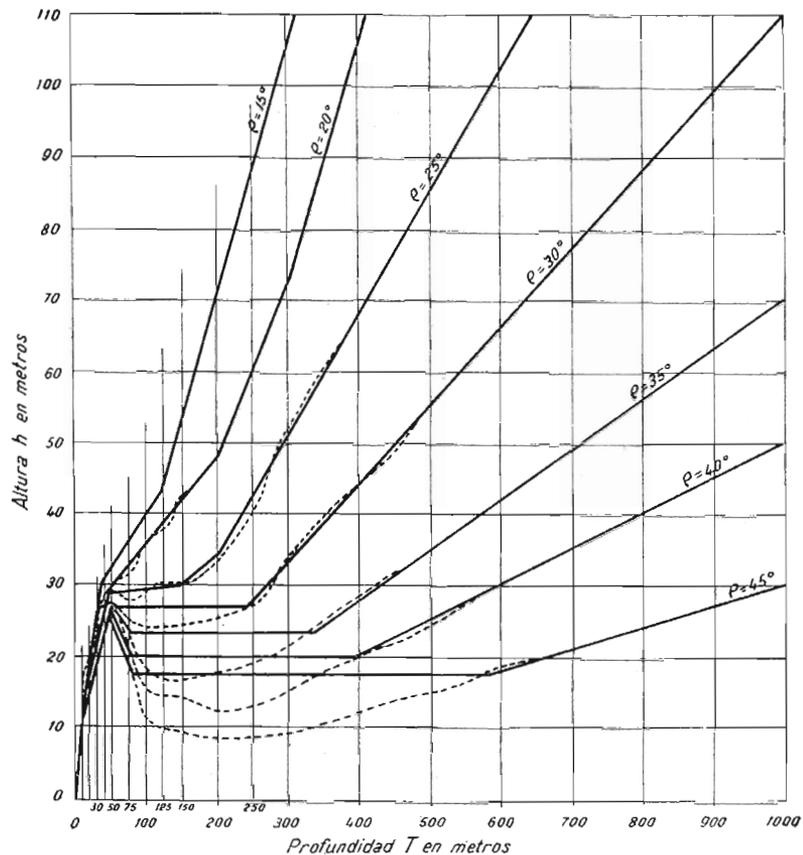
Dimensiones de la excavación:
altura $t = 8'00$ m.
anchura $b = 8'00$ m.



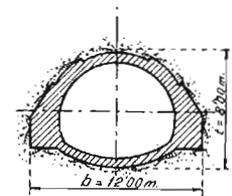
Linea de trazos, determinada por el cálculo.
Linea lnea, la práctica de aplicación.

Figura 103.

Diagrama de reducción de altura de carga para túneles de doble vía.



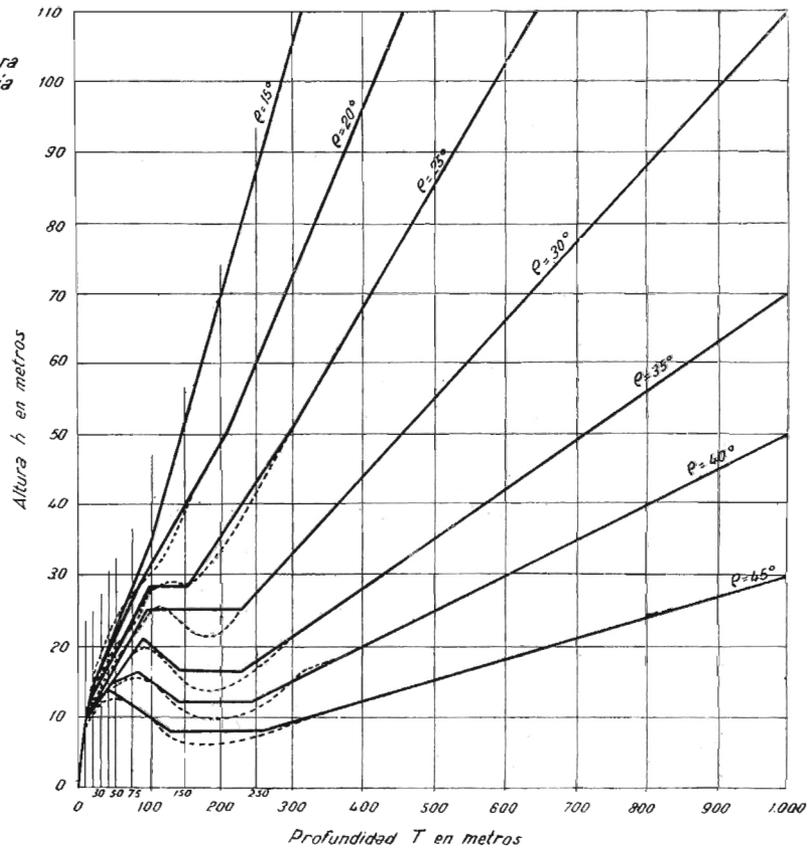
Dimensiones de la excavación:
altura $t = 8'00$ m.
anchura $b = 12'00$ m.



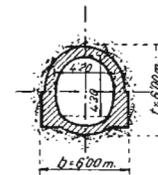
Línea de trazos, determinada por el cálculo.
Línea llena, la práctica de aplicación.

Figura 194.

Diagrama de reducción de altura de carga para túneles de vía estrecha.



Dimensiones de la excavación.
altura $t = 6'00$ m.
anchura $b = 6'00$ m.



Línea de trazos, determinada por el cálculo.
Línea llena, la práctica de aplicación.

Figura 195.

en un túnel; la forma y dirección de los estratos pueden cambiar el sentido e intensidad de los empujes en gran proporción. Supongamos un terreno homogéneo de roca estratificada, cuyo perfil geológico sea el indicado en la figura 196; en la zona *AB*, el túnel puede estar sujeto a fuertes empujes oblicuos, pues los estratos, de buzamiento acusado, pueden originar, incluso deslizamientos parciales; en el trozo *BC*, a pesar de ser la zona de mayor profundidad, por la forma de bóveda de los estratos, se descarga el túnel, y es posible que, a pesar de su gran cota, los esfuerzos sean mínimos; en *CDE* pueden volver a presentarse empujes oblicuos, que se reducen en *EF*, y en *FG* pueden presentar valores extraordinarios.

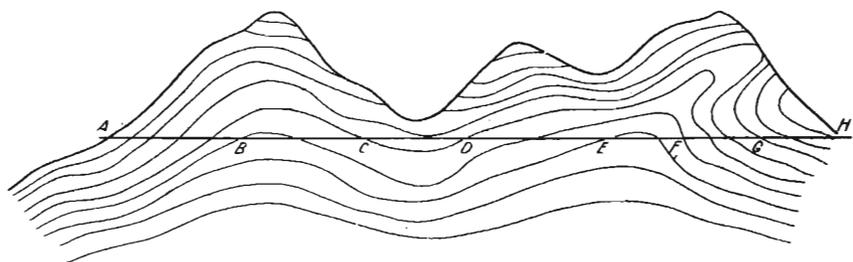


Figura 196.

En zonas determinadas puede haber filones de material incoherente, que, colocados entre dos estratos, sean origen de esfuerzos anormales extraordinarios. En las paredes de la excavación pueden presentarse asimismo esfuerzos anormales por el hinchamiento del terreno en contacto con el aire, o, más especialmente, con el agua; unas veces son fenómenos de carácter físico, como el aumento de volumen de las margas, en presencia del agua, o la fluidificación de la arena y arcilla; en otras ocasiones, es una reacción química, como ocurre con la hidratación del sulfato cálcico en forma de anhidrita, que, en presencia del agua, se convierte en yeso, dando lugar a aumentos de volumen, que llegan al 40 por 100; en el túnel de Hauenstein, en unos tramos en anhidrita, con una longitud de 800 metros, se pudo comprobar un hinchamiento del fondo, de cerca de 1 metro de altura.

Las deformaciones máximas del terreno, no se presentan inmediatamente después de practicada la excavación. Este fenómeno se explica por el hecho de que el asiento de la montaña tarda un cierto tiempo en tener lugar. Los esfuerzos concentrados, actuando en la superficie de la excavación, van produciendo una zona disgregada, que origina los

empujes; la formación del macizo incoherente es lenta; a medida que la zona superficial de la parte excavada se va disgregando, las cargas se concentran en nuevas superficies concéntricas con la excavada y de mayor radio; según la disgregación va avanzando en profundidad, el terreno va aumentando en cohesión y el valor de la carga concentrada va siendo menor; así se pasa, sin solución de continuidad, de una zona falta totalmente de cohesión, en la superficie excavada, a la roca sin alterar; la disgregación de la roca precisa tiempo; los esfuerzos que existen al principio no son los definitivos, y ello entraña un grave peligro; si la entibación que al principio se realiza no es lo suficientemente robusta, al aumentar la carga cederá, y este asiento provocará un aumento de las dimensiones del macizo disgregado y, por tanto, en definitiva, una mayor carga sobre el revestimiento. Por esta causa es preciso que la entibación sea, desde el principio, lo suficientemente robusta, y que el revestimiento se lleve lo más cerca posible de la excavación.

193. El agua en la excavación de túneles. — El agua, en la excavación de túneles, es uno de los peores enemigos que se presentan al constructor. Se puede encontrar en pequeñas filtraciones o bien en grandes manantiales. Aun cuando se presenta en pequeñas filtraciones, es causa de trastornos importantes; la humedad del ambiente perjudica a la entibación, y el agua, aunque sea en pequeña cantidad, es causa de la disminución en el rendimiento de la mano de obra; los inconvenientes adquieren mayor importancia, cuando se trata de ciertos terrenos, arena o, más especialmente, arcilla, que, por hidratación se hincha, produciendo grandes empujes. Otras veces el agua aparece en manantiales, que alcanzan caudales considerables; en el Simplón se llegó a la cifra de 1.200 litros por segundo; en el túnel del Arsa, en Istria, se aforaron 5.000 litros por segundo en época de lluvias, y en el túnel de Tanna, en el Japón, 3.450 litros por segundo. Caudales tan considerables, se comprende que obliguen al empleo de medios y a la construcción de obras especiales, que, en ciertos casos, elevan mucho el coste total de los trabajos.

194. La temperatura en la excavación. — Otro grave problema que puede plantearse en la construcción de grandes túneles, es la elevada temperatura que en algunos casos se alcanza; por ejemplo, en el Simplón, se llegó a la cifra de 53° centígrados; fácilmente se comprende la dificultad que representa trabajar a estas altas temperaturas, máxime si se tiene en cuenta que el ambiente del túnel es húmedo y viciado. Todo ello obliga a proyectar instalaciones de ventilación costosas de establecimiento y explotación, de las que se hablará más adelante.

195. Estudio geológico.— La enumeración de las dificultades que en la construcción de túneles se presentan, evidencia la necesidad, si el proyecto y presupuesto ha de tener visos de realidad, de un profundo y detenido estudio geológico de la zona en la cual se ha de desarrollar el trazado. Estudio que no determinará con exactitud los obstáculos que se han de encontrar, pues es difícilísimo, *a priori*, tener un conocimiento completo y detallado de la estructura geológica de la montaña, pero sí puede dar una idea aproximada de la constitución del terreno, e incluso en muchos casos, evitar entorpecimientos de importancia; cuanto tiempo y dinero se gaste — en grandes obras — en un estudio geológico previo, será ahorro en la ejecución de los trabajos, pues sólo así se podrá proyectar la obra con una relativa exactitud.

En general, el granito, las diabasas, ofitas y demás rocas volcánicas, son buenos materiales para la construcción de túneles; la excavación es costosa, pero los terrenos de este tipo no presentan dificultades importantes, como no sea la existencia de cavernas grandes o vetas llenas de materiales incoherentes; la entibación necesaria es pequeña o nula, y muchas veces no necesitan revestimiento.

Las rocas silíceas, arenas, gravas cuarzosas, pudíngas, etc., no presentan, en general, dificultades de construcción; los empujes que originan son reducidos; necesitan siempre revestimientos, aunque no importantes. Las rocas calizas, de excavación sencilla, tienen el inconveniente de su discontinuidad, debida a la solubilidad del carbonato cálcico en el agua; la existencia de cavernas que, a veces, pueden tener grandes dimensiones, y manantiales de agua, que pueden ser causa de trastornos graves en la construcción. El yeso tiene grandes inconvenientes; al hidratarse, aumenta considerablemente de volumen; se disuelve más o menos lentamente en el agua y ataca al cemento. Las arcillas pueden presentar grandes dificultades por su plasticidad y variaciones de volumen; necesitan entibaciones de importancia; son especialmente peligrosas las arcillas de gran finura y estructura laminar.

196. Fábrica del revestimiento.— Los túneles para vías de comunicación, ferrocarriles o caminos ordinarios, se construyen casi siempre revestidos; únicamente se podrá suprimir el revestimiento en caso de túneles en roca muy dura, resistente y perfectamente sana; aun en este caso, si la roca puede alterarse al cabo de un cierto tiempo, por la acción de los agentes atmosféricos, haciendo imprescindible revestir el túnel cuando esté ya en servicio, es recomendable dejar, en el perfil transversal sin revestir, un suplemento de sección de unos 30 centímetros, para ejecutar el revestimiento, si fuese preciso, sin tener que ensanchar, pues

la labor de ampliación de la sección del túnel en servicio, para dimensión tan reducida, es difícil y costosa.

Los materiales que se empleen en el revestimiento han de poderse colocar con facilidad; es importantísimo tener en cuenta que las condiciones de trabajo en la construcción de un túnel son difíciles; se dispone de poco espacio, la luz es mala, y frecuentemente hay agua. Los materiales han de ser resistentes, inalterables a la acción de los agentes atmosféricos, impermeables al agua y capaces de resistir a la acción de los gases que el tráfico produzca; hace años, el autor pudo comprobar personalmente la destrucción del mortero de las juntas del revestimiento en un túnel del ferrocarril de Portugalete a Santurce, por la acción de los gases de las locomotoras.

Las ventajas e inconvenientes de los distintos materiales de empleo corriente, son las siguientes:

Mampostería. — Tiene el inconveniente de que es preciso escoger las piedras, labor difícil y costosa, teniendo en cuenta las condiciones en que se trabaja dentro de un túnel.

Ladrillo. — De cualquier clase que sea, se coloca fácilmente; el ladrillo ordinario tiene pequeña resistencia y es poroso; no debe emplearse, por esta causa, en terrenos de fuertes empujes o donde existan filtraciones importantes; el ladrillo prensado es un material excelente por todos conceptos, pero de precio elevado.

Hormigón. — En bloques previamente preparados es de fácil manejo; si están bien ejecutados puede dar buen resultado por sus condiciones de impermeabilidad y resistencia.

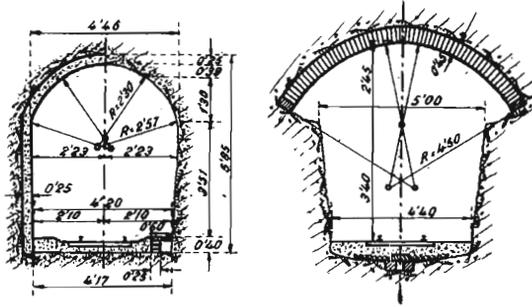
El hormigón en masa se emplea cada vez más; bien dosificado y construido, es impermeable e inalterable a la humedad; es fácil de ejecutar y tiene la gran ventaja de adaptarse perfectamente a las irregularidades de la excavación del túnel; por ello se emplea hoy mucho, no sólo en los estribos, sino también en la bóveda y contrabóveda, siempre y cuando no estén sometidas a fuertes cargas iniciales, pues, en este caso, el fraguado tendría lugar en malas condiciones y la resistencia final sería reducida.

Para aumentar la impermeabilidad del hormigón se pueden utilizar diversos impermeabilizantes, o añadir al mortero cal apagada o puzolana.

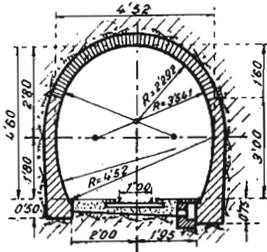
Hay que tener en cuenta, para el cálculo del revestimiento que, debido a las condiciones del ambiente del túnel, las cargas de trabajo admisibles son bastante menores que las aceptadas a cielo abierto para los mismos materiales; se toman coeficientes de seguridad de 1/10 para la bóveda y de 1/6 a 1/7 para los estribos. Cargas prácticas de trabajo admitidas son: 5 kilogramos por centímetro cuadrado, para fábrica de ladrillo corriente; 12 Kg./cm.², para fábrica de ladrillo prensado; 25 a

Ferrocarriles italianos

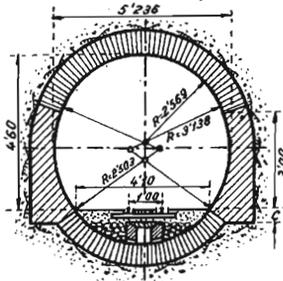
Ferrocarriles secundarios via normal
Revestimiento en roca muy consistente.



Revestimiento en roca consistente.



Revestimiento con contra bóveda en terreno de fuertes empujes.



Revestimiento de túneles de doble vía

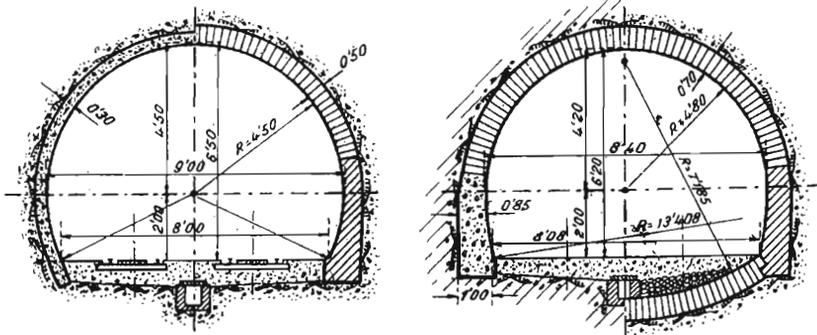


Figura 108.

diferentes elementos y constituyen un refuerzo importante; para lograr la perfecta impermeabilidad de las juntas, van calafateadas con madera, cuerda alquitranada o cemento. En la figura 201 puede verse un tipo de revestimiento de esta clase del túnel bajo el Elba, en Hamburgo.

Ferrocarriles suizos

Túnel del Simplon

Revestimiento en roca consistente.

Revestimiento medio.

Perfil para fuertes empujes horizontales.

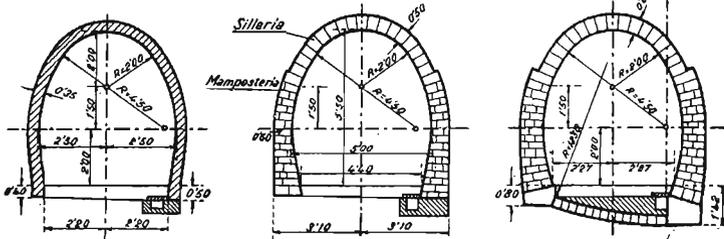


Figura 199.

Ferrocarriles austriacos

Vía sencilla

Vía doble

Perfil medio Perfil reforzado

Perfil medio Perfil reforzado

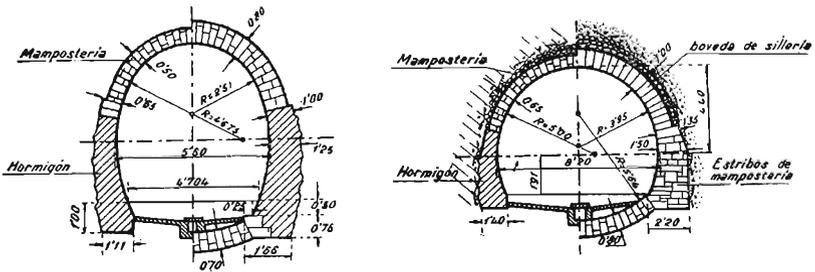


Figura 200.

Últimamente se ha empleado en algunos casos revestimientos de perfiles laminados y chapa, protegidos, para evitar su destrucción por la humedad, con una capa de hormigón.

198. **Hormigón armado.**— Su construcción, siempre complicada, no se presta para el revestimiento de túneles.

Puede estar indicado el hormigón armado en túneles a cielo abierto, especialmente para ferrocarriles metropolitanos en el caso de que, por estar situados muy cerca de la superficie, sea preciso tener una bóveda del mínimo espesor.

El hormigón armado se emplea también bastante para el refuerzo de revestimientos de túneles en funcionamiento.

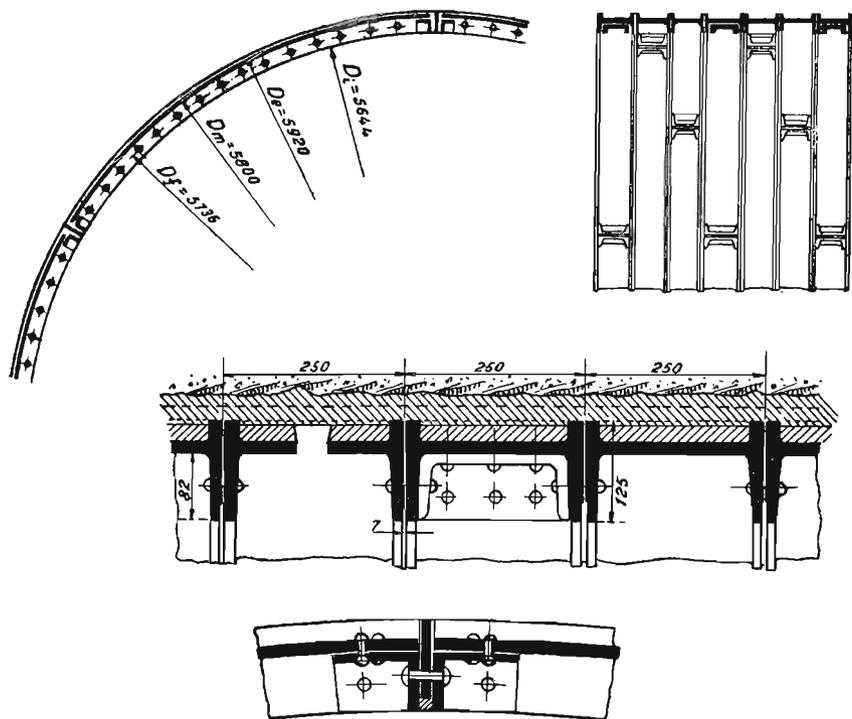


Fig. 201. -- Revestimiento metálico del túnel bajo el E.lba.

No es conveniente su empleo cuando existen grandes empujes iniciales, que impiden el buen fraguado del cemento.

199. Pozos. — Los pozos en los túneles pueden tener un fin simplemente constructivo, servir de puntos de ataque; en este caso, son provisionales y, terminada la construcción, se abandonan; el revestimiento que se emplea es el estrictamente preciso para sostener el terreno; en roca dura y resistente no se emplea, en general, revestimiento. La sección de los pozos puede ser rectangular o circular, según el servicio que hayan de prestar y la calidad de las tierras.

Los pozos permanentes se utilizan, principalmente, para la ventilación del túnel; en los túneles urbanos pueden servir de acceso a estaciones subterráneas; en este caso llegan a alcanzar dimensiones importantes. En relación con los materiales empleados en su revestimiento, repetimos cuanto se ha indicado al tratar de las galerías; por ser más fácil en los pozos la colocación de armaduras y el hormigonado, se emplea más el hormigón armado.

200. Estaciones subterráneas. — Los túneles de ferrocarriles metropolitanos, o líneas férreas ordinarias a su paso por grandes poblaciones, precisan la construcción de estaciones subterráneas. Suelen consistir en un ensanchamiento de la sección normal del túnel, capaz de alojar los servicios imprescindibles; los generales se suelen instalar en la superficie, cuando es posible; así sucede, por ejemplo, entre otras, en la estación del Quai d'Orsay, en París. En las estaciones subterráneas hay que estudiar cuidadosamente el acceso del público; puede hacerse por rampas, escaleras o bien por distintos medios mecánicos de servicio continuo (escaleras móviles, planos inclinados, etc.); se pueden emplear también grandes ascensores (estaciones del Metropolitano Madrileño de Sol y Red de San Luis), aunque el servicio discontinuo tiene inconvenientes cuando el tráfico es intenso.

El acceso de vehículos, cuando se trata de túneles para tráfico general, se puede hacer por rampas, con una pendiente del 3 al 5 por 100 (túnel bajo el Hudson, en Nueva York), o bien por ascensores (túnel bajo el Elba, en Hamburgo).

Los tipos de sección de estaciones, así como los materiales empleados, dependen del estudio cuidadoso de los servicios que han de prestar, de la naturaleza del terreno, y también del método constructivo que sea posible utilizar. La figura 197 reproduce la sección de una estación del Metropolitano Madrileño.

201. Defensa y evacuación del agua de filtraciones. — El agua que filtre del terreno es preciso evitar llegue al revestimiento y, si éste no es impermeable, penetre en la sección del túnel; porque es preciso para una buena explotación del servicio y, además, porque la fábrica, con filtraciones permanentes de agua, puede llegar a averiarse seriamente.

Son varios los sistemas seguidos para impermeabilizar los revestimientos; corrientemente, la bóveda se enlucce por su trasdós cuidadosamente y se rodea de una masa de piedra partida, colocada en seco, que sirve de dren; el agua de filtración, recogida a través de la piedra del dren,

va a unos canales de drenaje, que la llevan a las cunetas del túnel, de que luego hablaremos.

Cuando se trate de galerías urbanas, donde es preciso alcanzar una perfecta impermeabilización, se extreman las precauciones en el enlucido del trasdós, utilizando impermeabilizantes, o incluso tela encerada, fieltros asfaltados o capas de asfalto; el enlucido del intradós de la bóveda con impermeabilizante, es también eficaz; en el Metropolitano Madrileño se ha empleado este sistema. Para que los huecos del dren no se rellenen de arcilla y detritus arrastrados por las aguas, se dispone algunas veces una capa de hormigón pobre y poroso, entre el terreno y la piedra de drenaje. Cuando el caudal es importante, se recurre a disposiciones especiales de filtración, estableciendo sobre la bóveda un sistema de drenaje que asegure la evacuación del caudal total; últimamente se han empleado, con éxito, inyecciones de cemento entre la bóveda y el terreno, para formar una capa de mortero rico entre ambos, que evita la llegada del agua a la fábrica.

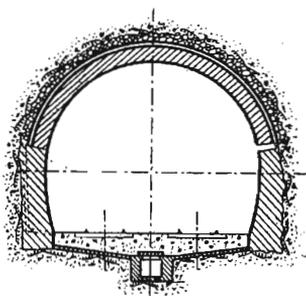
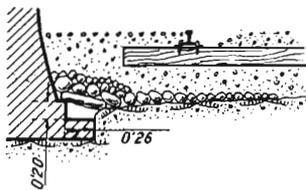


Figura 202.

Las aguas recogidas pasan, por medio de pequeños canales, a las cunetas del túnel, que, además, de esta función, sirven para recoger y evacuar las que eventualmente pudieran llegar a su interior; las cunetas se pueden colocar lateralmente, o bien en el centro de la sección; la primera disposición se emplea en túneles de vía sencilla y de caminos ordi-



Figura, 203. a.

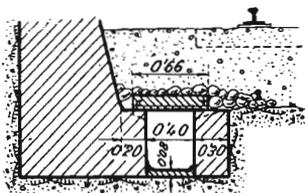


Figura 203. b.

narios; la cuneta central se utiliza generalmente en túneles de doble vía.

Las cunetas son canales revestidos, de hormigón generalmente, con sus paredes y fondo enlucidos, para que, con la menor pendiente, se pueda alcanzar la mayor velocidad y evitar la formación de depósitos; como las cunetas, al mismo tiempo que de canales de evacuación de las aguas de drenaje, han de servir como drenes de la plataforma del túnel,

su cubierta ha de proyectarse permeable; es frecuente el empleo de losas con juntas abiertas. Las dimensiones de la sección, para caudales corrientes, son de 40×40 a 50×50 cm.

En las cunetas se deben disponer pequeños pozos de registro, cada 60 a 80 m., que permitan su fácil revisión y reparación.

Las figuras 202, 203 y 204 muestran distintas disposiciones adoptadas.

202. Refugios. Depósitos.— Todo túnel debe tener, a distancia máxima de 50 m., refugios, para que en ellos pueda entrar el personal

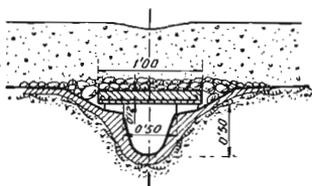


Figura 203, c.

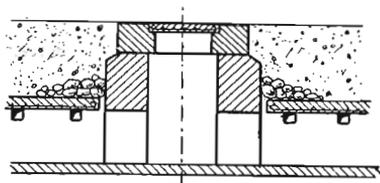


Figura 204.

de servicio que se encuentre dentro del túnel, en el momento del paso del tren. Son entrantes practicados en el revestimiento, que tienen de 1.80 a 2,20 m. de altura, de 2 a 2,50 m. de anchura y 1 m. de profundidad (fig. 205).

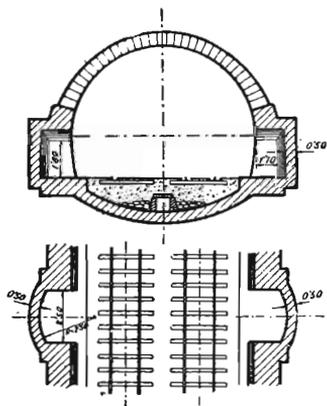


Figura 205.

Los depósitos son espacios de mayor capacidad, en los cuales pueden almacenarse los pequeños materiales y herramientas necesarios para las reparaciones de la vía; se colocan aproximadamente a distancia de 500 metros uno de otro; normalmente van cerrados con una puerta, para seguridad del material que en ellos se guarda (fig. 206).

203. Bocas de acceso.— En las bocas de acceso de un túnel, es preciso proyectar las obras que resulten imprescindibles para defender su entrada de desprendimientos del terreno que la rodea. La naturaleza de éste

figurará la importancia de los muros de contención o defensa a realizar; si el túnel está proyectado en un terreno flojo, habrá que proyectar muros laterales de sostenimiento que aseguren la estabilidad de los talu-

des de la trinchera, y habrá que defender el frente de la embocadura, para evitar la caída de piedras o el desprendimiento de tierras de la parte superior. Cuando el terreno sea roca dura, la embocadura se puede limitar a un sencillo arco, que acuse, al exterior, la forma del túnel y su revestimiento.

Las bocas de acceso de los túneles se suelen construir de sillería o sillarejo, combinados con mampostería; deben ser obras cuidadas, pero

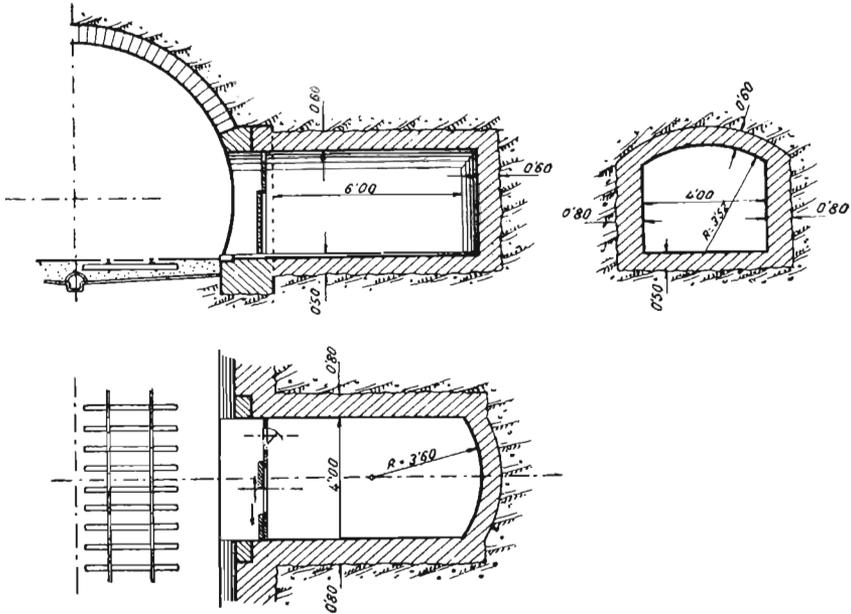


Figura 206.

sin motivos decorativos, que resultan, la mayoría de los casos, completamente inapropiados (figs. 207 y 208).

204. Ventilación. — El problema de la ventilación de túneles, se plantea: *a)* durante la construcción, y *b)* durante la explotación.

Los gases que vician el aire son, principalmente, el óxido de carbono (CO), anhídrido carbónico (CO₂), anhídrido sulfuroso (CS₂).

El óxido de carbono es gas de alto grado de toxicidad; en muy pequeña proporción, el 1 por 1.000, produce la muerte al cabo de un cierto tiempo de permanencia en la atmósfera viciada; en proporción del 0,10 por 1.000, ya es perceptible y molesto; cuando su proporción alcanza el 0,30 por 1.000 provoca malestar general, palpitaciones y respiración difi-

cil; en proporción del 0,50 por 1.000, causa fuertes dolores de cabeza y desvanecimientos. Los efectos del óxido de carbono se notan al cabo de cierto tiempo; como mínimo, media hora; por esta causa, como la permanencia en túneles metropolitanos es menor, no se sienten sus efec-

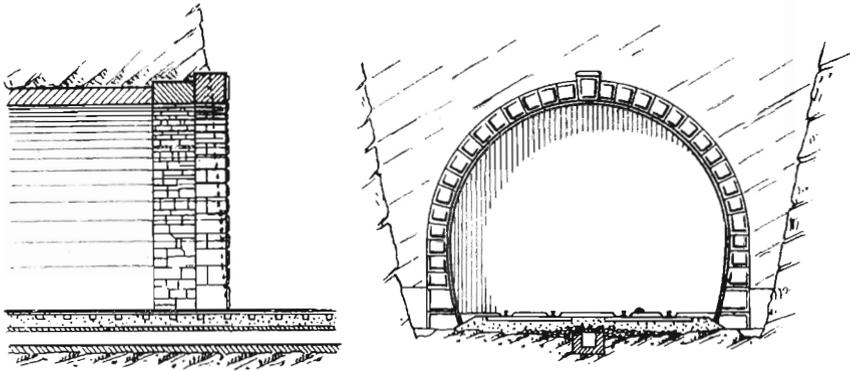


Figura 207, a.

tos, aunque en algunos casos se lleguen a registrar cifras tan elevadas como las del 0,60-0,68 por 1.000, comprobadas en Londres.

El anhídrido carbónico (CO_2) entra en el aire libre en una proporción del 0,30 por 1.000; se empieza a percibir cuando pasa de la cifra

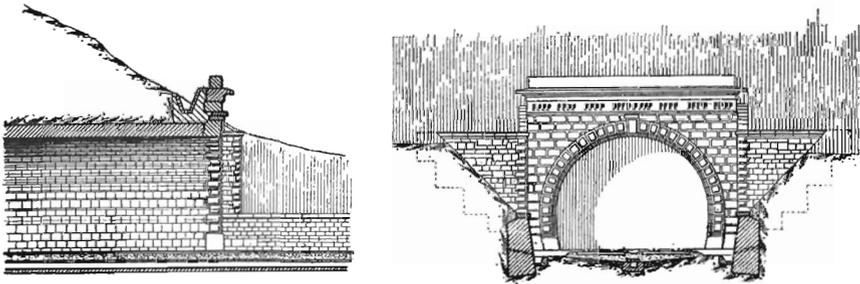


Figura 207, b.

del 2 por 1.000; es posible el trabajo con proporción del 10 por 1.000; cuando alcanza la cifra del 50 por 1.000, la actividad ya no es posible, y con cantidades superiores al 100 por 1.000 es peligroso, pudiendo, si la proporción aumenta, causar la muerte.

El anhídrido sulfuroso (SO_2) es un veneno muy fuerte, que origi-

na la muerte con proporciones muy reducidas, 0,50 a 0,60 por 1.000; afortunadamente, se encuentra en muy pequeña cantidad en el aire de los túneles, aunque estén mal ventilados; el anhídrido sulfuroso, unido a la elevación de temperatura y aumento de humedad, cuando el túnel está mal ventilado, ataca el cemento de la fábrica del revestimiento y a los elementos metálicos, por ejemplo, los carriles.

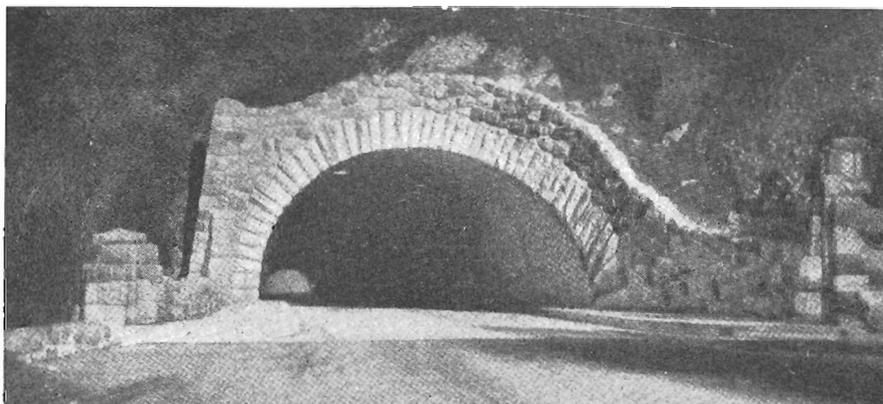


Fig. 208. — Boca de acceso del túnel del "Columbia River Highway".

Como límites admisibles, se pueden aceptar en túneles bien ventilados :

Óxido de carbono.....	0,09	por 1.000
Anhídrido carbónico	10	" "
Anhídrido sulfuroso	0,005	" "

Durante la construcción, son causas de viciación del aire :

a) Los gases producidos por los obreros y animales; un hombre, sin trabajar, produce de 17 a 20 litros CO_2 por hora, y hasta 35 litros, en trabajo; como media pueden considerarse 28 litros. Un caballo o mula produce 230 litros a la hora.

b) Gases debidos a los explosivos: en un trabajo a plena sección se consumen de 350 a 450 Kg. al día, de dinamita; en una galería de avance, de 25 a 35 Kg. Un kilogramo de dinamita produce de 200 a 225 litros de CO_2 .

c) El humo de las locomotoras de servicio, cuando son de vapor, que produce de 150 a 200 litros hora de CO_2 .

d) Las lámparas de acetileno o aceite, que desprenden de 15 a 20 litros hora de CO_2 ; hay normalmente de 300 a 500 lámparas.

- e) El polvo que en el trabajo se produce.
- f) El calor y humedad del cuerpo humano, y
- g) Causas varias, entre las cuales tienen importancia las deyecciones del personal y los restos de comida, que, al descomponerse, no solamente son causas de malos olores, sino que pueden llegar a producir H_2S , gas sulfhídrico, altamente venenoso.

Los gases tóxicos se originan durante la explotación del túnel, por el humo de las locomotoras, cuando se trata de túneles para ferrocarriles, y por los escapes de los coches, en los túneles de caminos ordinarios. A la acción de los gases tóxicos se une el aumento de temperatura, en los túneles a gran profundidad, y el elevado grado de humedad del ambiente; todo ello puede causar: a) la asfixia o envenenamiento del personal de servicio o del público; b) el deterioro de la fábrica del túnel y del material metálico; c) disminución del coeficiente de adherencia entre el carril y la rueda, en los túneles de ferrocarriles.

El problema de ventilación es más importante cuando se trata de túneles de vía simple, con tracción de vapor y, especialmente, cuando a esta circunstancia se suma una fuerte pendiente; si el tren tiene que llevar una locomotora en cola, su personal está expuesto a graves accidentes, por la gran viciación del aire, unida al calor; para evitar este peligro, hay que recurrir frecuentemente a la tracción eléctrica.

En el caso de explotación de una línea ferroviaria con tracción a vapor, es preciso tener en cuenta el tanto por ciento global de $CO_2 + CO + H_2$; la producción de estos gases depende, en proporción muy importante, de la forma de llevar el fuego de la locomotora; según experiencias realizadas en la línea italiana Chiusi-Florenca (Prof. Ing. GUIDO CORBELLINI, *L'Ingegnere*, mayo 1936), con un fuego bien llevado se llegó a un mínimo de $CO + H_2$ del 0,5 por 100, alcanzándose cifras mucho más elevadas con fuegos mal llevados (fig. 209). El peligro de un mal régimen de fuego, debe siempre tenerse en cuenta.

Como término medio puede considerarse que un tren, en horizontal, consume las siguientes cantidades de carbón:

Trenes rápidos corrientes	7 Kg. por Km.
" de gran velocidad	10 " " "
" de mercancías	13 " " "

Cuando la vía es en pendiente, se puede suponer un aumento de consumo de carbón, respectivamente, de 2 Kg., 3 Kg. y 4 Kg. por cada milésima de pendiente. Cada kilogramo de carbón produce 1,85 Kg. de $CO_2 + CO$, y, por tanto, un buen carbón—con el 80 al 90 por 100 de C—puede considerarse produce 1,66 metros cúbicos de $CO_2 + CO$ por kilo-

gramo. Si V es el volumen total de gases producidos por el tren en el recorrido del túnel; L , la longitud de éste, y S , su sección, la proporción de gases contenida en el túnel — suponiendo que la velocidad del aire en el interior del mismo sea nula — será $\frac{V}{L \times S}$ m.³ por m.³ = $\frac{V}{L \times S} \times \times 1.000$ litros por metro cúbico.

Si el aire del túnel tiene una cierta velocidad, habrá que tenerla en cuenta para determinar el volumen total en el cual se diluyen los gases

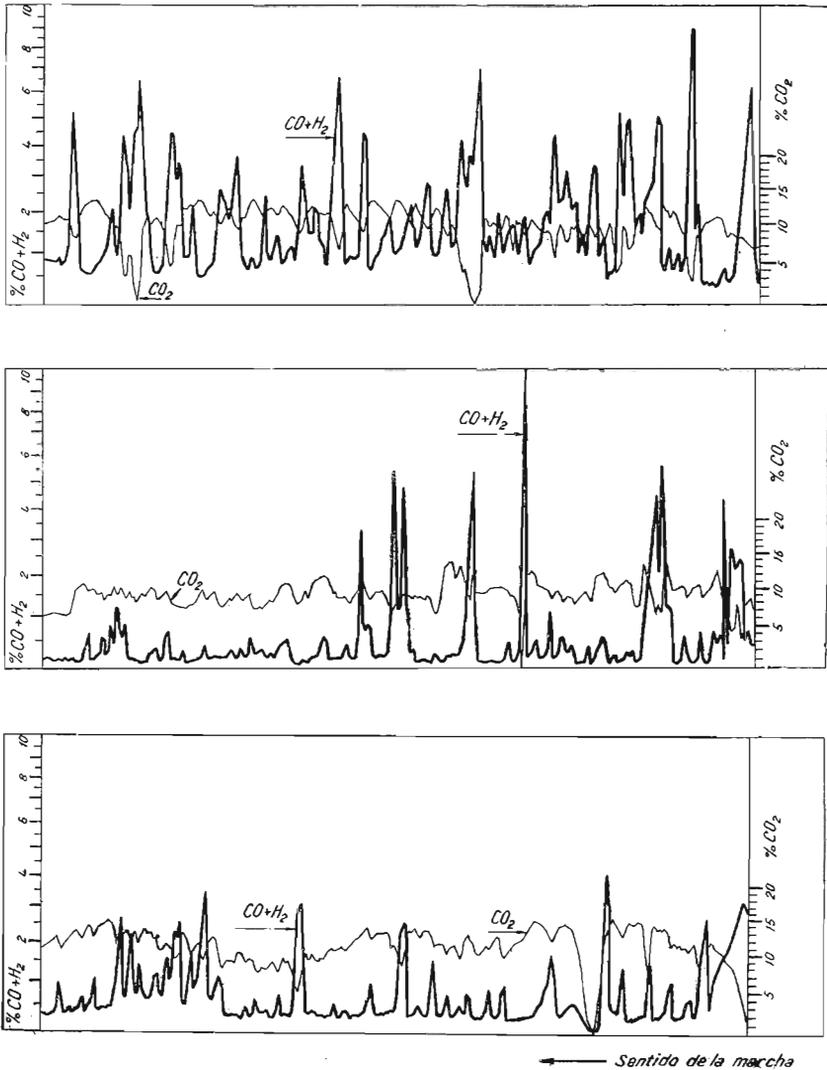


Figura 209.

producidos por la locomotora, en el tiempo total que tarda en recorrer el túnel; la resolución de los diferentes casos que pueden presentarse, según la marcha del tren sea en el mismo sentido o en sentido contrario de la dirección del viento, son problemas de planteamiento elemental, pero en los cuales entran coeficientes que varían, según la sección del túnel, naturaleza de las paredes, velocidad y características del tren; todas estas circunstancias hacen variar la velocidad del viento en el túnel, y, por tanto, la proporción de la contaminación y, en definitiva, el volumen de aire que es preciso cambiar.

En el caso de túneles de caminos ordinarios, debe considerarse que cada gramo de gasolina da lugar a 17-18 gramos de productos de la combustión, de los cuales un 15 por 100 está constituido por CO_2 , y el 2 por 100 por CO . El motor de un vehículo tipo medio se puede calcular produce de 40 a 50 litros de óxido de carbono por minuto. La combustión, en algunos motores de gran número de revoluciones, produce tetraetilo de plomo, que es muy peligroso cuando alcanza la proporción de 0,02 por 100. La determinación de la cantidad de gases tóxicos que pueden producirse en la explotación de un túnel para camino ordinario, se hace teniendo en cuenta el número de vehículos y su velocidad en los momentos de las puntas de tráfico.

Todo problema de ventilación se plantea en los términos siguientes: el tren, durante su permanencia en el túnel, produce una cantidad de G metros cúbicos de gases tóxicos; durante el tiempo T minutos, que el tren tarda en recorrer el túnel, habrá pasado dentro de él un volumen de aire puro

$$S \times V_a \times T$$

siendo V_a la velocidad del aire dentro del túnel en metros por minuto, y S , su sección; si queremos que la proporción

$$\frac{G}{S \times V_a \times T}$$

no pase de un cierto límite, tendremos que aumentar la cantidad de aire puro, o sea el denominador de la fracción anterior, o, en definitiva, el valor de V_a , único que podemos cambiar en la práctica.

La velocidad del viento en el túnel y, por tanto, el caudal disponible, se puede ver alterado por diferentes causas: *a)* por el rozamiento de las paredes; *b)* por causas accidentales, entre las cuales se han de tener en cuenta, como las más importantes, la alteración que el tránsito, trenes o vehículos, produce. El coeficiente de rugosidad varía de 0,020

a 0,030, dependiendo de la naturaleza de las paredes y dimensiones de la sección. El tránsito puede favorecer la ventilación si marcha en el sentido de su corriente, o perjudicarla si va en sentido contrario; se puede abordar el cálculo matemático en cualquier caso, pero es difícil, y sus resultados muy inciertos; normalmente, las causas accidentales de alteración del régimen de ventilación, se tienen en cuenta aplicando un coeficiente de aumento.

El procedimiento de cálculo de la potencia precisa, es sencillo; tenida en cuenta la pérdida de carga por rozamiento, se determina la fuerza viva de la masa de aire necesaria, de cuyo dato se deduce la potencia; a la cifra obtenida se aplica un coeficiente de aumento, normalmente del 20 por 100, para tener en cuenta las alteraciones de régimen, por causas accidentales. Para determinar la fuerza viva de la masa de aire necesaria para alcanzar el grado de purificación previsto, hay que conocer el peso del metro cúbico de aire en las distintas condiciones de temperatura y humedad, peso que puede llegar a variar hasta en un 15 por 100; para ello conviene considerar atentamente las condiciones locales, haciendo determinaciones en diversas épocas del año, con el fin de que, los datos obtenidos, concuerden con la realidad. Puede determinarse el valor de γ por la fórmula:

$$\gamma = \frac{10.000 p_m}{R T}$$

en la cual $p_m = \frac{p_1 + p_2}{2}$ presión media en kilogramos (p_1 y p_2 , presiones en las dos boquillas); T , la temperatura absoluta, y R , la constante de los gases = 29,27; a la presión atmosférica de 1.830 Kg./m.² y a 15° C. de temperatura $\gamma = 1,23$ Kg./m.³.

Determinado el peso del aire, el cálculo de la potencia necesaria se realiza como sigue:

La pérdida de carga, j , debida al rozamiento, es decir, la altura geométrica de la columna del mismo fluido, necesaria para mantener el movimiento, es

$$j = \lambda \times \frac{L}{d} \times \frac{V_a^2}{2g};$$

donde:

- L = longitud, en metros, del túnel.
- d = diámetro de la tubería circular, en metros.
- V_a = velocidad, en metros por segundo, del aire.
- λ = función expresiva del rozamiento, número sin dimensiones.

Si la sección no es circular, puede generalizarse el resultado definiéndola por su radio hidráulico, $R = \frac{S}{P}$; donde P es el perímetro de la sección, y recordando que $d = 4R$, entonces

$$j = \lambda \times \frac{L}{4R} \times \frac{V_a^2}{2g}$$

La diferencia de presiones entre los dos extremos del túnel, será:

$$\Delta p = \gamma \times j$$

en la cual γ es el peso específico del aire (kilogramos/m.³).

La fuerza total precisa para vencer el rozamiento será:

$$\Delta p \times S = \gamma \times j \times S$$

El recorrido en un segundo es igual a V_a , y, por tanto, la potencia necesaria (fuerza por camino recorrido) será:

$$\Delta p \times S \times V_a = \gamma \times \lambda \times \frac{L}{4R} \times \frac{V_a^2}{2g} \times S \times V_a$$

$S \times V_a$ es el caudal total de aire; luego la potencia por unidad de caudal precisa para vencer la resistencia del rozamiento, valdrá:

$$\gamma \times \frac{\lambda}{4R} \times \frac{V_a^2}{2g} \times L = \gamma \times K \times \frac{V_a^2}{2g} \times L;$$

si a esta potencia, precisa para vencer el rozamiento, añadimos la necesaria para mover la masa de aire si no hubiese rozamiento, que será:

$$\frac{1}{2} M V^2 = \frac{1}{2} \frac{\gamma}{g} \times V_a^2$$

tendremos la potencia total necesaria en kilogramos metros, que valdrá:

$$h = \frac{\gamma V_a^2}{2g} + \gamma K \frac{V_a^2}{2g} \times L = (1 + K L) \frac{V_a^2}{2g} \times \gamma$$

si V es el volumen total de aire preciso, la potencia P en HP. será, siendo η el rendimiento de la maquinaria:

$$P = \frac{h \times V}{\eta \times 75} \times 1,20;$$

siendo 1,20 el coeficiente a aplicar, para tener en cuenta las alteraciones accidentales.

El número $\lambda \left(K = \frac{\lambda}{4R} \right)$, es función del número de REYNOLDS y de la rugosidad; prescindiendo de la primera influencia, lo que es lícito si el régimen es netamente turbulento:

$$\lambda = 0.0096 + \sqrt{\frac{\epsilon}{d}}$$

Vidrio	$\epsilon =$	10×10^{-8}
Latón plomo	$\epsilon =$	20×10^{-8}
Cemento liso	$\epsilon =$	300×10^{-8}
Caucho	$\epsilon =$	400×10^{-8}
Tuberías de hierro estirado.....	$\epsilon =$	1.000×10^{-8}
Idem de fundición nueva.....	$\epsilon =$	5.000×10^{-8}
Idem de ídem usada.....	$\epsilon =$	10.000×10^{-8}
Mampostería	$\epsilon =$	10.000×10^{-8}
Grandes rugosidades	$\epsilon =$	600.000×10^{-8}

Cuando, por la forma de estar construído el túnel, existe una corriente natural de aire en el sentido de la ventilación, se determinará, por el procedimiento expuesto, la potencia que representa, potencia que se restará de la anteriormente calculada; la diferencia será la potencia precisa.

La ventilación puede hacerse:

- 1.º Por uno o varios pozos de ventilación, en los cuales generalmente se aspira el aire.
- 2.º Ventilación por inyector de aire. sistema SACCARDO.

Ⓢ 205. **Ventilación con pozos.**— Es el sistema más corriente y recomendable cuando la construcción de los pozos, por su cota y clase de terreno, no resulta de coste prohibitivo; está formado por uno o varios pozos simétricamente distribuídos, en relación con la entrada del aire, y dotados de aspiradores que producen una fuerte corriente desde las bocas del túnel o las de entradas del aire; la simetría de los pozos de entrada y aspiración, es conveniente para la regularidad del régimen de ventilación; cuando se trate de un pozo único, deberá colocarse en el punto medio. En galerías urbanas, donde el coste de los pozos de ventilación no es, en general, elevado, se suelen proyectar varios pozos de entrada de aire; en el punto medio entre cada dos de ellos, se sitúa uno de aspiración. En túneles bajo el agua, donde no es posible situar el pozo de ventilación en el centro, se hace llegar el aire por un conducto especial al punto

central, y la aspiración se realiza por los dos extremos. En la figura 210 se resumen los esquemas de estas tres disposiciones.

En todo caso, habría que calcular, de acuerdo con el procedimiento expuesto, los valores de h correspondientes al pozo y al túnel propia-

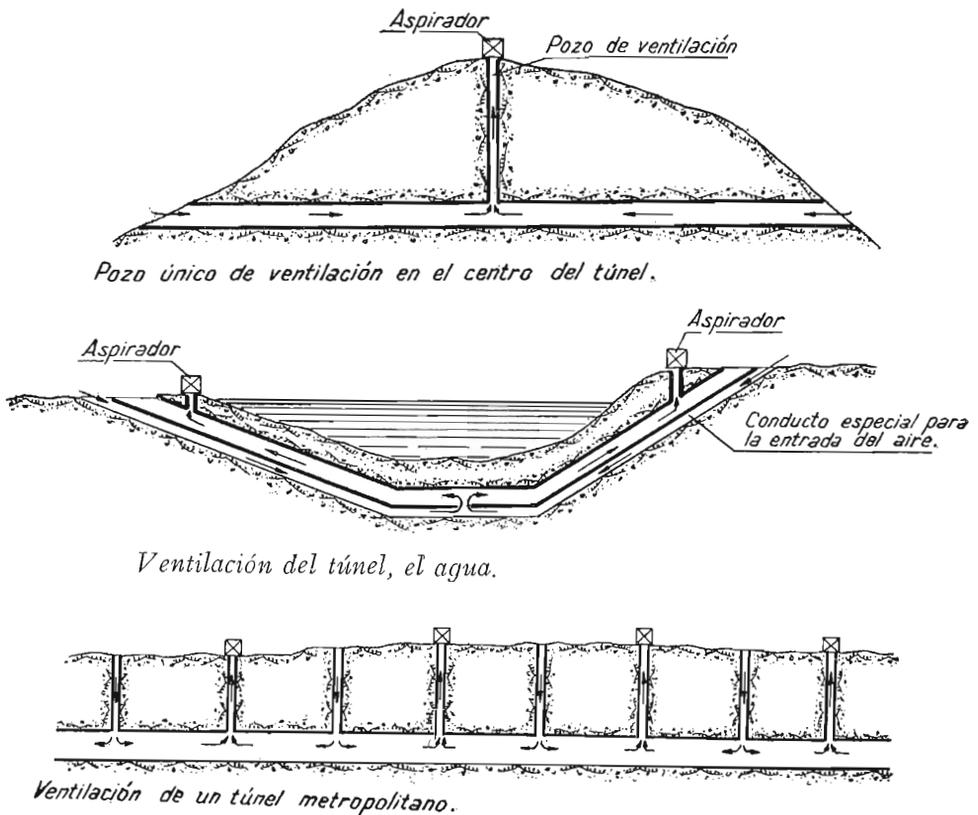


Figura 210.

mente dicho; su suma dará el valor h total, que servirá para el cálculo de la potencia necesaria.

206. Ventilación con inyector de aire, sistema SACCARDO. — Este sistema, propuesto por el Ingeniero MARCO SACARDO, en el año 1891, se aplicó por primera vez en el túnel de Pracchia, sobre la línea Bolonia-Pistoia, y posteriormente en gran número de túneles en Italia, Alemania y Austria.

El sistema consiste en una cámara que se dispone, en forma anular,

alrededor de una de las bocas del túnel; en ella el aire se comprime, y se inyecta a presión en el túnel. El aire, que sale a gran velocidad de los inyectores, al aumentar la sección, transforma su energía cinética en energía estática, incrementando considerablemente la presión y obligando a moverse a la masa de aire que el túnel contiene, hasta que alcanza una velocidad de régimen.

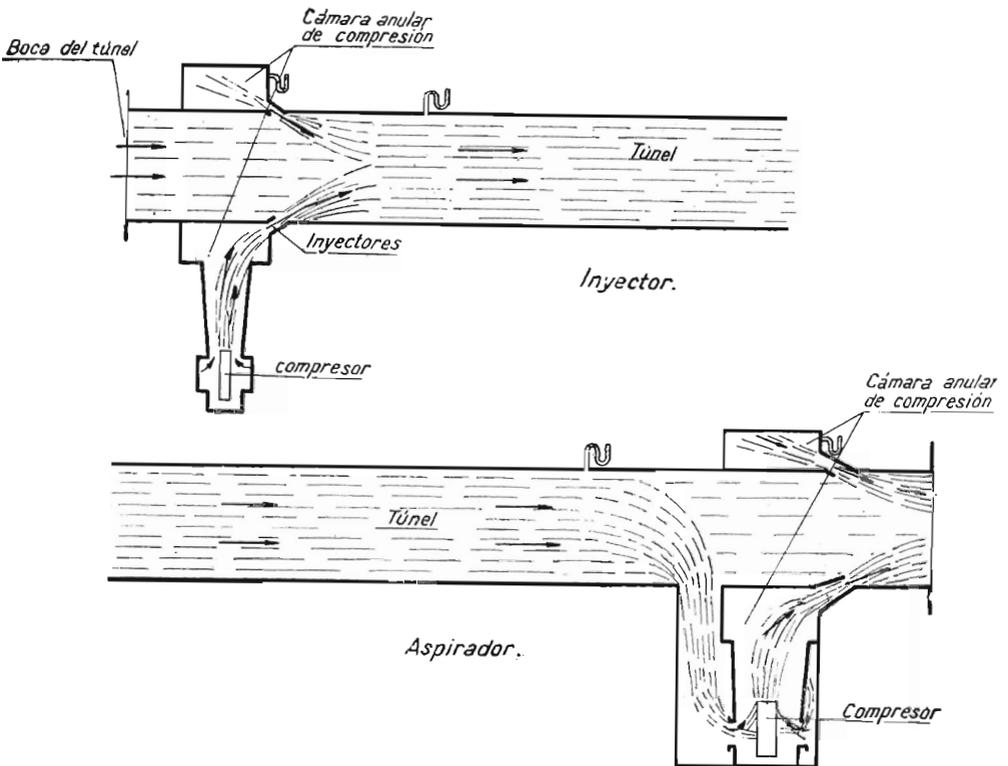


Figura 211.

El aparato, en vez de ser inyector, puede ser aspirador; en este caso, la depresión que produce obliga a moverse a toda la columna de aire.

El Doctor Ingeniero WIESMANN, teniendo en cuenta que la dirección de la corriente natural del aire dentro de un túnel puede variar, propuso la construcción de un aparato SACCARDO reversible, que funcionase como inyector o como aspirador, según los casos, para que siempre lo hiciese en el sentido de la corriente de aire del túnel, mejorando sensiblemente el rendimiento.

En las figuras 211 y 212 pueden verse los esquemas del sistema

SACCARDO, para aspiración e inyección, y un detalle de la instalación completa.

207. **Ventilación de túneles para caminos ordinarios.** — Ejemplo notable de ventilación es el de Holland-túnel: el tráfico en este túnel,

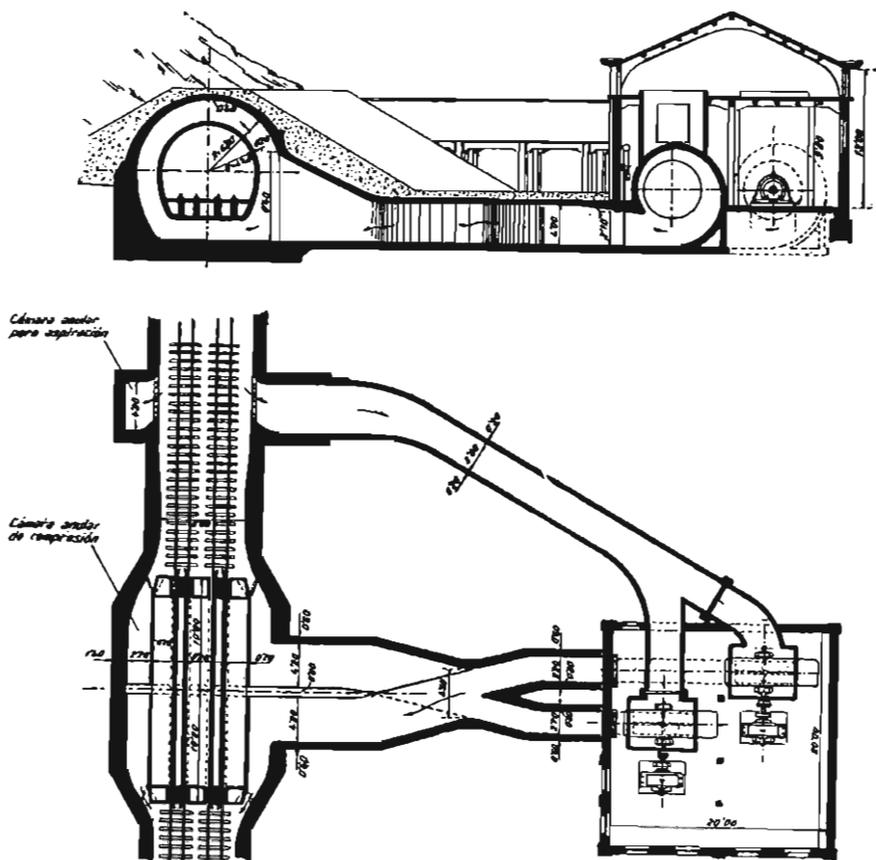


Figura 212.

cuyas secciones pueden verse en la figura 186. es muy intenso y precisa una enérgica ventilación, que sería incómoda si se hiciese inyectando aire a presión por un solo punto, con recambio longitudinal de aire; existiría, además, un grave peligro, en el caso de que se declarase un incendio en un punto del túnel, que se propagaría, con gran intensidad, longitudinalmente, aparte de que todo el túnel se llenaría de humo, haciendo difi-

les, o imposibles, los trabajos de salvamento. Por ello se emplea el método de ventilación transversal, que puede verse en la figura; el conducto de aire puro, lo reparte en gran número de entradas transversales, recogiendo el aire viciado otro, situado en la parte superior. Con este sistema no se produce corriente de aire; prácticamente, no se nota movimiento alguno; la atmósfera se mantiene uniforme, con el mismo grado de contaminación y desaparece el peligro que hemos indicado en caso de incendio.

El mismo sistema del Holland-túnel se ha empleado en América en otras instalaciones, entre las cuales se encuentran el túnel de Oakland y el último túnel bajo el Hudson, en Nueva York. En todos ellos hay instalados aparatos registradores de la cantidad de óxido de carbono, que, gráficamente, van dando la concentración de este gas, y, conectados eléctricamente con los cuadros de mando, hacen que los ventiladores den mayor cantidad de aire cuando la proporción de óxido de carbono excede de la admitida. Sistema similar se ha empleado en el túnel de Wawona.

La máxima concentración de óxido de carbono tolerada en estos túneles, de acuerdo con el U. S. Bureau of Mines, es de cuatro partes por 10.000.

208. Ventilación durante la construcción. — Conocida la organización probable de la obra y los datos que antes se expusieron referentes a las cantidades de CO_2 producidas por los operarios y maquinaria, se puede fácilmente calcular la cantidad aproximada de aire, que será preciso inyectar para que el trabajo se realice en condiciones aceptables.

Como término medio, las cantidades de aire puro precisas son, según *Tunnelbau*:

1 operario, con una lámpara, consume en 24 horas . . .	240 m. ³ de aire fresco.
1 caballo consume en 24 horas	850 m. ³ de aire fresco.
1 kilogramo de dinamita precisa	300 m. ³ de aire fresco.

Las cifras anteriores son, en realidad, pequeñas, si se tienen en cuenta los factores que hemos enumerado y la necesidad de que el aire, después de las explosiones, se purifique rápidamente, para que las interrupciones del trabajo sean lo más cortas posible. Otro factor que influye asimismo para que sea preciso aumentar el volumen del aire, es la necesidad de disminuir la temperatura que, por el calor del terreno, en unos casos, y, en otros, por surtidores de aguas termales, llega a alcan-

zar cifras que no son compatibles con la posibilidad de un trabajo eficaz; por ejemplo, en el Simplón, la roca llegó a alcanzar la temperatura de 56° C. Se puede hacer que descienda la temperatura del ambiente aumentando el volumen del aire que se cambia. En *Tunnelbau*, se dan los siguientes datos prácticos:

TÚNEL	Móntcenis.	Gothardo.	Arlberg.	Simplón.	Lotschberg.
Longitud m.	12.849	14.944	10.240	19.803	14.536
Altura máxima sobre la clave del túnel.....	1.654	1.706	720	2.135	1.673
Temperatura de la roca en grados centígrados	29,5	30,8	18,5	56	34
Volumen de aire inyectado: metros cúbicos por segundo	7,0	1-2	3-6	35	11-25

Según WIESMANN, la cantidad de aire preciso, en metros cúbicos por segundo, para galerías de avance y túneles de vía sencilla y doble de distinta longitud, son los siguientes:

Longitud hasta kilómetros.	SIN USAR EXPLOSIVOS			USANDO EXPLOSIVOS		
	Galería de avance.	Túnel de		Galería de avance.	Túnel de	
		Vía sencilla.	Doble vía.		Vía sencilla.	Doble vía.
1	0,3	0,7	1,0	0,6	1,5	2
3	0,5	1,5	2,0	1,0-1,6	2,5-3	3
6	—	—	—	2,25	4	5
10	—	—	—	—	5	7

209. Sistemas de ventilación durante la construcción. Ventilación natural por pozos. — Cuando la cota no excede de unos 50 metros, puede emplearse, para lograr la ventilación, el sistema de pozos o chimeneas; el aire viciado, más caliente, y, por tanto, menos denso, tiende a salir por la parte superior de la galería, si en ella se practica una conducción, que lleva el aire al pozo, en la forma que, esquemáticamente, se indica en la figura 213; los pozos o chimeneas pueden ser de pequeño diámetro, hasta unos 0,30 m.; si la cota del túnel es superior

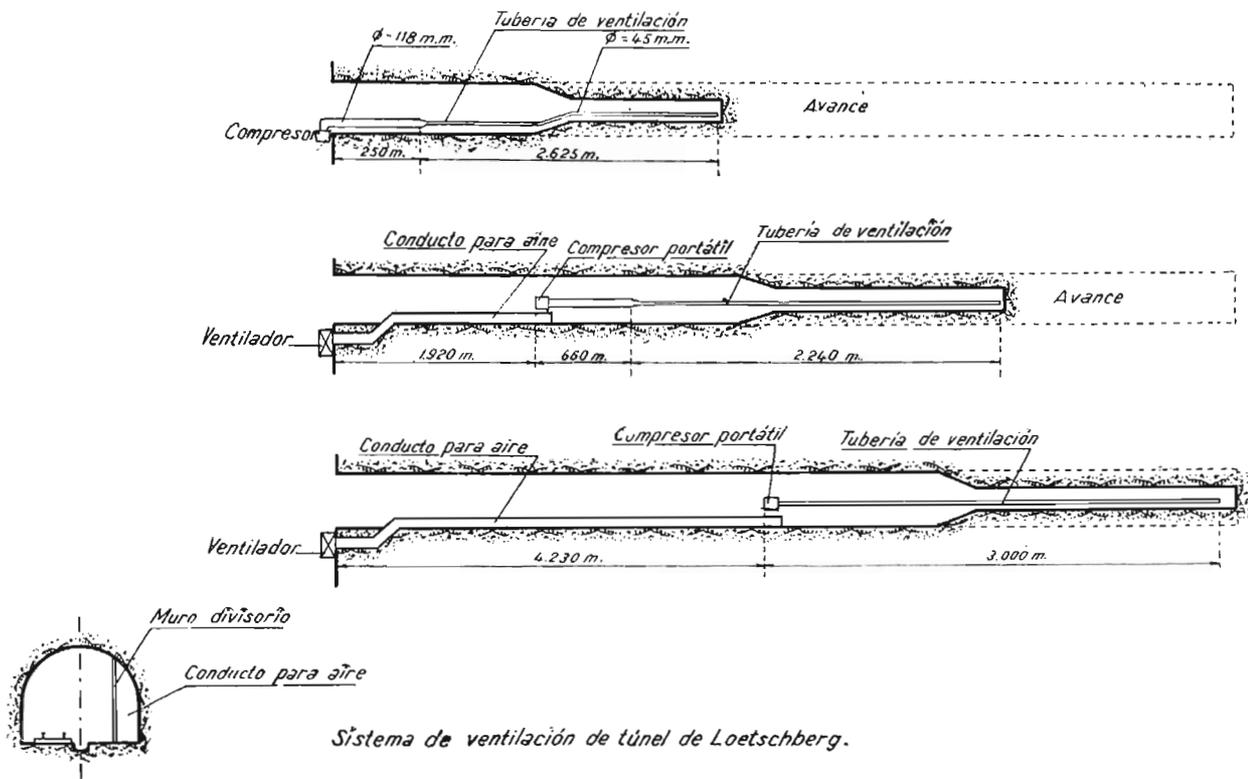


Figura 214.

la longitud de las tuberías alcanzó 1.920 m., se instalaron en la boca de entrada unos ventiladores que enviaban aire puro, por un conducto de fábrica, hasta un punto en el cual era recogido por un compresor portátil y enviado a presión a la zona de trabajo; el conducto para aire puro, según puede verse en la figura, consistía simplemente en un muro vertical, que aislaba, a este objeto, una parte de la sección ya construída del túnel. En otros casos, se han construído conductos especiales de fábrica.

211. Acondicionamiento de temperatura.— En la ventilación de los túneles durante la construcción, es imprescindible, no solamente suministrar el aire preciso para no exceder de los límites de contaminación señalados, sino también lograr el debido acondicionamiento de la temperatura, que, en algunos casos, llega a cifras, como ocurrió en el Simplón, totalmente inadecuadas para la eficacia del trabajo. La temperatura del terreno, que depende de la correspondiente del exterior, hasta una cierta profundidad — de 10 a 12 metros —, va aumentando a profundidades mayores, en función de ellas.

Se denomina “pendiente geotérmica” la variación de temperatura en 100 metros de profundidad, y “grado geotérmico”, la profundidad precisa para alcanzar una variación de temperatura de un grado.

El grado geotérmico varía, según la naturaleza de los terrenos y sus características, entre las cuales la inclinación y espesor de los estratos tiene gran importancia; la existencia de manantiales de agua en la excavación influye, asimismo, de un modo favorable o desfavorable, según se trate de aguas frías o termales. El agua en pequeña cantidad a todo lo largo de la excavación, produce mayor efecto refrigerante que el mismo caudal brotando reunido en uno o dos puntos. La disminución de la temperatura de la roca, es indicativa de la posible existencia de agua en las proximidades. El grado geotérmico varía, en general, de 40 a 50 metros.

Las líneas geotérmicas no siguen paralelamente a la superficie del terreno; el grado geotérmico es mayor en las partes altas de las montañas que en las llanuras; la pendiente geotérmica es menor en la montaña que en terreno llano.

Como en la temperatura de la roca influyen múltiples factores, su medida experimental es la única forma de tener datos seguros para el cálculo de la refrigeración. La temperatura de la roca se determina practicando en ella orificios, en los cuales se colocan los termómetros; una vez hecho esto, los agujeros deben taparse cuidadosamente con arcilla o material similar; hay que cuidar que los termómetros estén colocados

en seco; los agujeros deberán practicarse en la superficie del terreno, en el plano vertical del eje del túnel.

Deben hacerse lecturas repetidas, con pocas horas de intervalo, durante un período de tiempo de varias semanas, leyendo a diferentes

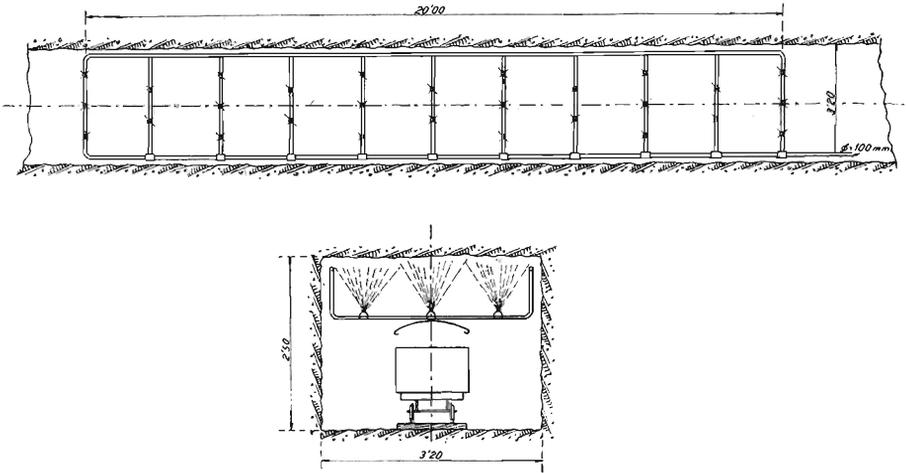


Figura 215, a.

horas del día; los orificios donde se alojan los termómetros deben tener una profundidad de 1,50 a 2 metros; al mismo tiempo que se hacen lecturas de la temperatura del terreno, deben determinarse las del am-

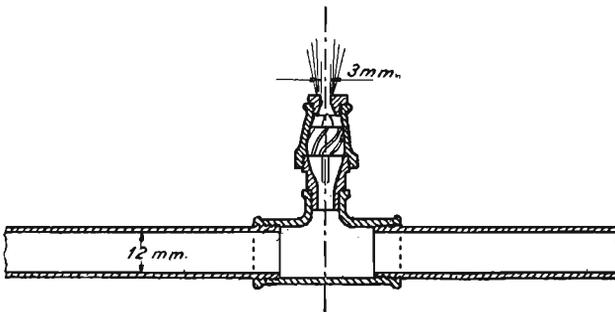


Figura 215, b.

biente. Una vez obtenida la temperatura del terreno y su relación, por tanto, con la del ambiente, si se dispone de los datos de ésta durante un largo período, como ocurre normalmente en casi todos los países, se pueden deducir las máximas y mínimas temperaturas previsibles del terre-

no; suponiendo un grado geotérmico para las distintas clases de roca que se prevé encontrar, según el estudio geológico, se podrá determinar la curva de las temperaturas probables en la excavación. Los grados geotérmicos, según las diferentes clases de roca, son los que figuran en el siguiente cuadro:

TERRENO	Materiales.		Estratificación.		Estratos inclinados menos de 45° con la horizontal.	
	Secos. — Metros.	Húmedos. — Metros.	Vertical. — Metros.	Horizontal. — Metros.	Secos. — Metros.	Húmedos. — Metros.
Granito	33-34	35,50-37				
Caliza						
Pizarra						
Arcilla						
Arenisca	28	—	35-37	28-29	29,50	31,50
Gneis	—	—				

Durante la construcción del túnel, se miden las temperaturas de la roca en la excavación, directamente en ella, sin ventilación, tomando además, al mismo tiempo, la temperatura del aire dentro del túnel.

La refrigeración del aire de ventilación se hace, corrientemente, obligándolo a pasar a través de una cortina de agua finamente pulverizada, y mojando en la misma forma la roca de las paredes y techo de la excavación. La disposición general de refrigeración y tipo de pulverizador pueden verse en la figura 215. El acondicionamiento del aire, por una instalación de refrigeración especial, y la introducción de hielo en carretones dentro de la excavación, están en desuso; el primero, por su coste muy elevado y el segundo, por ineficaz.