

TUNELES PARA CARRETERA

Por LUIS CABALLERO DE RODAS Y COLMEIRO,

Ingeniero de Caminos,

Presenta el autor un estudio de carácter general sobre el tema del epígrafe, desde el punto de vista de las necesidades de la moderna circulación, y por ello dedica cierta amplitud a los problemas de iluminación y ventilación e instalaciones de seguridad.

Consideraciones generales.

Los túneles en carreteras, en sí, no constituyen ninguna novedad; desde hace muchos años existen varios en servicio; si nos concretamos a España, podemos citar; el de Lizarraga, en la carretera de Alsasua a Estella; los del Enmascarat, en la de Alicante a Valencia; algunos en la de Jaca a Sallent; ahora se a abierto a la circulación uno de 200 m. en el Barranco de Aguas, próximo a Alicante; existe el de Viella en la del Valle de Arán, etc. Todos ellos, excepto el último, son de pequeña longitud y su existencia se debe a la necesidad de resolver un problema de orden puramente técnico de trazado. La mayoría son túneles de *contrafuerte*, no es admisible una cota de 30 m. de desmonte; surge el túnel como el viaducto, por necesidades constructivas, sin tener en cuenta la cantidad de usuarios: el tráfico; podríamos decir que ante el paso de una cresta se la horada por no haber otra solución práctica.

El perfeccionamiento de los vehículos que utilizan las carreteras, su aumento en número y capacidad de carga, así como su velocidad, las han convertido en un sistema arterial de transporte esencial; tanto, que el ferrocarril ha visto interrumpido su *sestear de monopolio* por una competidora peligrosísima, la carretera; se ha defendido con armas numerosas. La pretendida "coordinación de transportes" es realmente la "sumisión" al ferroviario del otro, existe coordinación (o puede existir) cuando dos potencias iguales tratan en igualdad de condiciones y no es ese el caso de la competencia carretera-ferrocarril. La cuestión de transportes por carretera depende de la Dirección General de Ferrocarriles; aún no hemos podido averiguar si alguna vez se ha justificado el nombre de "Construcción, explotación y estadística" que se le da a una de las Secciones de la Dirección General de Carreteras.

Pero la fuerza de los hechos es irrefrenable y hoy existe, no sólo en España, en todo el mundo un tráfico viario importantísimo. Ello exige mejoras de firme, de trazado y de perfil; en el primer aspecto se ha conseguido mucho; si bien se presta una atención preferente a la superficie de rodadura, sin

que merezca la misma la resistencia total del firme, su espesor y su cimiento; el tamaño de los vehículos impone radios mínimos de las curvas al propio tiempo que la velocidad; finalmente, el criterio en los perfiles longitudinales varía en absoluto; de las múltiples pequeñas rasantes se pasa a las largas, que permiten en los motores un régimen continuo.

El aumento de tráfico en las poblaciones y sus accesos crea problemas de cruce de circulaciones que sólo se resuelven situándolas a distinto nivel; de ahí los pasos subterráneos, modelos los de la *cintura* de París. La necesidad de la continuidad de paso en cualquier circunstancia, la preocupación por la comodidad y rapidez de la marcha por carretera hacen pensar en los túneles de divisoria. Es decir, surge el túnel como conclusión de unas premisas sentadas por la realidad, facilitada por el progreso ingenieril, algo así como la tracción eléctrica en los ferrocarriles.

No deja de pesar otra circunstancia, especialmente en los túneles urbanos, la menor vulnerabilidad ante ataques aéreos y la mayor facilidad de hacerlos inútiles para el paso en una retirada, máxima en los subfluviales. Acaso sea una mera coincidencia, pero el auge del túnel en carretera aparece al mismo tiempo que las centrales y fábricas subterráneas, las exploraciones de simas terrestres y grandes profundidades marítimas. Ante las amenazas, el hombre trata de esconderse en lugar seguro o que estima serlo, no sabemos si la humanidad se oculta o trata de ocultarse avergonzada de contar entre sus miembros algunos capaces de repetir, por su cuenta, el papel que está reservado a la Divinidad desde los tiempos bíblicos, la destrucción total de las ciudades.

Sea por la causa que sea, o por varias, hay una tendencia subterránea, en lo que nos concierne en la carretera; hay que tener presente que se hace el túnel para los usuarios, y no hay que olvidar que entran en juego en la circulación subterránea factores no técnicos, sino humanos, pero que son de primer orden, porque un túnel de carretera debe permitir una circulación rápida, cómoda y segura. Conducir un coche tres kilómetros, por ejemplo, por un *pasillo* cubierto, de siete metros de ancho, es

un suplicio chino, al que se suman una cierta depresión de ánimo y un retardo en los reflejos muy importantes. Existe una sensación de ahogo que sólo se combate con una ventilación perfecta combinada con un acondicionamiento del aire puro, que se introduzca en el túnel para mantener un grado conveniente de humedad; no se soportan bien los ruidos, *se tolera* el del coche propio, no los de los ajenos; las sensaciones acústicas varían como el logaritmo de la necesidad de las vibraciones (ley de Fechner). La visión no es perfecta, es preciso evitar la atmósfera *neblinosa* que actúa sobre la zona central de la retina la de visión más clara; todo esto, que dará lugar a una ampliación más adelante, da idea de que el proyecto de un túnel para carretera es mucho más complicado de lo que parece a primera vista.

Es preciso tener en cuenta todos esos factores que imponen una iluminación adecuada, una ventilación que asegure la respirabilidad de la atmósfera del túnel y las disposiciones e instalaciones de comodidad y seguridad complementarias; todo ello se trata en puntos separados a continuación.

No terminaremos esta nota preliminar sin citar un cálculo hecho para el túnel del Mont Blanc, que se proyecta con dos circulaciones. Si un vehículo se para por avería, los que le siguen han de detenerse; serán treinta coches los que hay parados, a los cinco minutos sube el número a 45, antes de cerrar la vía al tráfico; resultado, que en 200 m. hay 15-20 autos que producen 900 litros de C.O. por minuto, lo que exigiría introducir en ese tramo 2 250 m.³ de aire puro para que la proporción de gas tóxico no pase de 1/2 500 (4/10 000). Como las instalaciones previstas no suministrarían más que 450 m.³ de aire puro, el porcentaje de C.O. sería de 20/10 000, muy tóxico.

Este ejemplo pone de relieve la importancia de las instalaciones de seguridad, ventilación e iluminación del túnel (la oscuridad aumenta la depresión psicológica), así que lo que sigue no es una exposición académica, es algo fundamental. Es preciso ir al proyecto de túnel con la mira puesta en su función, vía de tráfico: el problema constructivo no presentará nada nuevo, se han ejecutado ya en todos los terrenos, se sabe bastante y se dispone de maquinaria cada vez más perfecta. Primero el problema de tráfico, luego *el agujero*.

I. Determinación de la sección.

La determinación de la sección de un túnel para carretera es una cuestión sumamente compleja porque influyen en ella muchos factores; pero en cualquier caso, hay uno que es preciso fijar ante todo, el número de vías de circulación, conocido el gálibo exigido, tendremos ya una de las dimensiones fundamentales de aquélla, su ancho, que en el caso de Es-

paña será $(3,50 \times n + 2a)$, siendo n el número de vías y a el ancho de las aceras, en n precisamente está el problema.

Si nos concretamos a túneles de carretera franceses, porque es el país que tenemos más cerca (y porque son los que conozco), tenemos los siguientes datos:

St. Cloud-autopista del Oeste = longitud, 854 m.

Número de circulaciones	5
Gálibo transversal	3,00 m. (por circulación).
Número de vehículos/mes ...	1 000 000
Máximo en un día	46 000
Máximo vehículos/hora	5 000

Croix Rousse-Acceso a Lyon = longitud total, 1 780,21 m.

Número de circulaciones	4
Gálibo transversal	3,00 m. (por circulación).
Máximo calculado/hora	4 000 vehículos.

Mont Blanc (en proyecto) = longitud, 12,000 m.

Número de circulaciones	2
Gálibo transversal	3,00 m. (por circulación).
Máximo calculado/hora	360 vehículos.

Hemos citado el último a título de información, ya que su longitud excede de lo previsible en España. Considerando tan sólo los dos primeros, vemos que hay un factor común, el rendimiento por vía de circulación, mil vehículos. En el túnel de St. Cloud, tres de las vías pueden ser de salida de París (los sábados) o de entrada en la capital francesa (los lunes); sin embargo, hay taponamiento porque el número de automóviles que han pasado (1 000/hora y vía) no es el de los que querían pasar. En el túnel de Lyon, hoy por hoy no hay problema, se ha establecido con una amplia previsión.

En la actualidad no hay ningún tramo de carretera en España por el que transiten 5 000 coches por hora ni mucho menos; no se llega tampoco a los 1 000, rendimiento de una vía, pero un túnel es una obra definitiva, superdefinitiva, si se nos permite la palabra y, por tanto, su proyecto se ha de estudiar con gran amplitud, siquiera ello suponga un gasto elevado de primer establecimiento.

El gálibo transversal de 3,50 m. adoptado en España es muy suficiente (en Francia se toma de 3,00 m. para los coches ligeros y de 3,30 para los camiones); por tanto, hay cierta comodidad para circular en coche y a velocidad relativamente elevada. En los túneles se suele limitar a 60 Km./hora (Croix Rousse, Mont Blanc). La capacidad de tráfico de cada vía de circulación se calcula que varía de 1 200-2 000 vehículos hora.

Si tomamos la primera cifra supone un coche cada tres segundos, como los 60 Km./h. son 16 metros/1", en cada 50 m. hay un vehículo; longitud que permite frenar *si se va con la máxima aten-*

ción, el aprovechamiento óptimo de una vía de circulación supone que todos los usuarios pueden mantener los 60 Km./h. constante en el túnel, no parece prudente ni práctico reducir la posibilidad de marcha a una dirección ante un tráfico importante posible, y en todo caso, para los efectos de cálculo, no es aconsejable contar con una velocidad superior a 40 Km./h.

El túnel de dos circulaciones, en cuanto a tráfico, es equivalente a dos de una, porque es imprescindible prohibir salirse de la fila; la solución sólo es aceptable en casos de tráfico muy reducido, hay que pensar que un túnel se amplía difícilmente.

El ideal es el túnel de cuatro circulaciones, ya que se pueden clasificar los tráficos en las dos direcciones, pesado y ligero, las dos vías de cada sentido estarán separadas por un bordillo y cada una de ellas, señalada en el pavimento. Los adelantos se hacen sin peligro. En caso de un tráfico extraordinario de guerra, la capacidad es de 2 000-2 400 vehículos hora; es decir, de 200 000 toneladas/día por lo menos. Una avería que inmovilice un camión es un *incidente*, no un *accidente*. En ese caso cualquier pavimento se hace *trizas*; con cuatro circulaciones se pueden hacer reparaciones en dos de ellas,

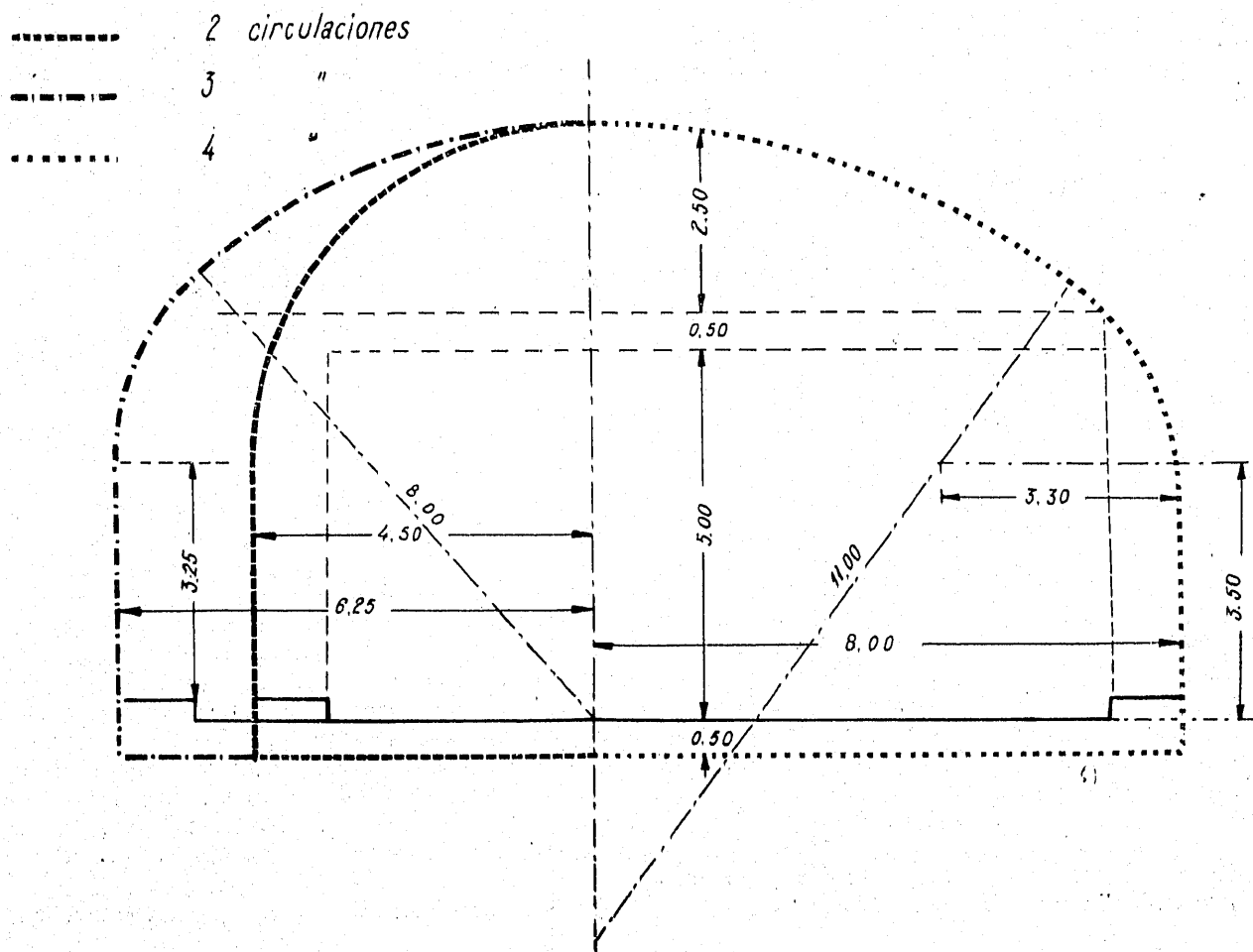
sin interrumpir el servicio y conservarlo en buen estado. Como hemos anotado al principio, es la solución ideal y, además, la europea en túneles de *superficie*, no bajo el agua; caso en el que un aumento de sección supone un gasto enorme.

En un túnel bajo montaña, al pasar de dos circulaciones a tres, en cuanto a gastos de construcción supone un aumento de 33 por 100, pero pasar de tres a cuatro sólo eleva el coste en 20 por 100 (cifras aproximadas); es decir, crece el coste más despacio que la capacidad del túnel, cosa natural puesto que cada vez la vía que se añade es un porcentaje más pequeño de la sección total.

Como una primera aproximación y más que nada para tener relaciones, vamos a suponer que el gasto de iluminación es proporcional al ancho del túnel, y que el de ventilación crece como la relación de los cubos del tráfico. Tendremos así:

Iluminación para dos vías	1 Kw.
» para tres vías	1,5 »
» para cuatro vías	2 »

Como al pasar de dos a tres circulaciones no suponemos que las tres vayan a *plena carga*, sino que la central es suplementaria para cruces y adelantos,



calcularemos que el tráfico aumenta 50 por 100 de una vía. Llegamos a las cifras siguientes:

2 circulaciones, 2 000 vehículos hora-ventilación	1 Kw.
3 circulaciones, 2 500 vehículos hora-ventilación	2,0 »
4 circulaciones, 4 000 vehículos hora-ventilación	8 »

Aun como *idea* se ve que las cuatro circulaciones son un ideal muy caro. Insistimos, la ley de semejanza aplicada no es completamente legítima, pero para la presente nota puede ser suficiente. Claro es que la ventilación 8 es para el gasto máximo de tráfico, y cabe proceder por partes en la instalación de grupos, sea en el número de pozos (o galerías) de aducción de aire, sea en su número y potencia en cada uno de aquéllos.

vehículos/hora, hay que ir a las cuatro circulaciones con todas sus consecuencias. La solución de tres, como definitiva, no parece satisfactoria: al aire libre se improvisan las circulaciones suplementarias que se quiera a poca costa (relativa y en general); en un túnel, no, pero siempre el *tráfico previsible manda*.

II. Iluminación.

No olvidemos de que aquí se trata de túneles de longitud del orden de un kilómetro y superiores; en ellos ha de instalarse iluminación propia, ya que no es posible cruzarlos a oscuras, ni se puede admitir que los vehículos utilicen los faros. El problema del alumbrado de un túnel no es sencillo, como no lo es el de su ventilación, del que luego trataremos.

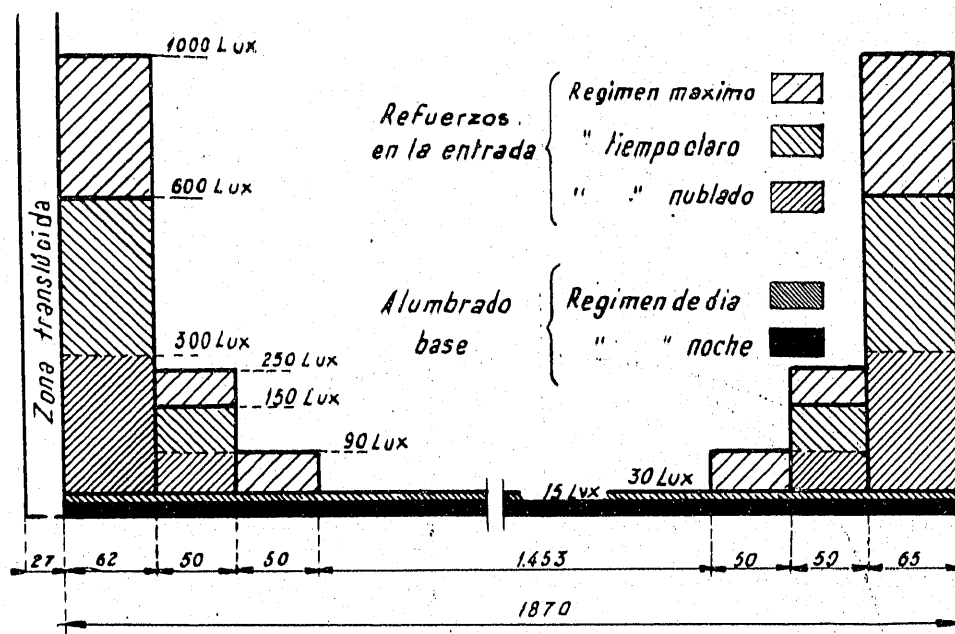


Figura 1.ª

Elementos más competentes, con más datos, pueden afinar las cifras y sobre todo una casa especializada; dadas la longitud del túnel, su sección y el tráfico, podrá cifrar muy aproximadamente el gasto de ventilación y el de iluminación.

La solución de tres circulaciones ofrece posibilidades de adelanto que es preciso reglamentar severísimamente en evitación de accidentes; puede servir también para orientar el tráfico por dos de aquéllas en las *puntas* o para clasificar los vehículos, pero no será nunca completa.

En resumen, estimamos que dado el carácter de un túnel, obra prácticamente no modificable, debe estudiarse *a fondo* su tráfico probable, y si en un plazo previsible se puede suponer una *punta* de 2 000

Hay que tener en cuenta el funcionamiento del ojo humano, son vulgares los fenómenos de deslumbramiento al pasar de la oscuridad a la luz y de ceguera en el tránsito contrario, cualquiera de ellos hay que evitarlo a los conductores de vehículos en el cruce de un túnel. Se desprende inmediatamente de ello que el alumbrado no debe ser uniforme, sino decreciente de las bocas a una zona central en la que se tomará como tipo una intensidad aceptable para iluminación urbana nocturna; por ejemplo, 15 lux. Una distribución razonable de intensidades de alumbrado es lo que se dibuja en la figura 1.ª y que corresponde al túnel de la Croix Rousse, en Lyon.

Se señalan en él las intensidades correspondien-

tes a las diferentes circunstancias exteriores, día claro, nublado, noche y alumbrado reducido en caso de emergencia; la longitud de los *escalones*, 50 metros, no es caprichosa. El iris, diafragma regulador de la luz que incide en la retina necesita tres segundos para sus oscilaciones máximas, a 60 Km. por hora; el espacio recorrido en ese tiempo es precisamente 50 metros.

Pero hay más; no es prudente pasar de 150 000 lux a los 1 000 del primer tramo iluminado, a cuyo fin se matizará la luz mediante dos tramos de 50 metros de longitud de túnel artificial translucido, constituidos por elementos resistentes de hormigón armado y placas de vidrio. Aun así, que parece que se han tenido en cuenta todas las circunstancias, hay una cuestión final: la del trazado de las entradas al túnel, que deben ser en curva y de tal modo que desde su centro no se vean las bocas, o sea el exterior, se evita así un efecto de contraluz molesto. No olvidemos que en los subterráneos se produce una depresión fisiológica que retarda los reflejos, así que hay que disponer las cosas de modo que el espíritu de los conductores esté lo más libre de preocupaciones permanentes innecesarias que sea posible.

La continua visión del exterior, así como la existencia de una atmósfera opalina, dan lugar a una visión defectuosa en la retina; hay dos zonas, la central de imagen clara y la periférica que la da confusa. La primera es la última que aparece al enfocar un objeto o adaptarse a un cierto grado de iluminación y la que primero se pierde. Esto, naturalmente, hay que evitarlo.

Respecto a cómo se debe realizar el alumbrado del túnel, tenemos un ejemplo moderno de ello, el de la Croix Rousse. Se emplean tubos fluorescentes; sistema, por otra parte, cada vez más extendido para toda clase de iluminaciones. Se dispondrá un cordón continuo de tubos a lo largo del túnel que se reforzará en las zonas de las entradas; puede colocarse el cordón de mínimo doble a unos 45° de la clave de la bóveda, que se doblará con otros dos a 20°, aproximadamente, del mismo punto; el estudio de esta cuestión debe ser hecho por una casa especializada, a la que se le entregará el gráfico de iluminación, así como los datos referentes a color y naturaleza del revestimiento del túnel y su pavimento. Se proyectarán todas las instalaciones desde los transformadores, líneas con cables Pyrotenax con protectores de úmica, grupos de reserva, red de distribución (doble) hasta los menores detalles. La única advertencia que cabe hacer es que los tubos estarán en *resalte* sobre la bóveda, se ha demostrado prácticamente que la visión es más clara, los objetos (en este caso vehículos) no tienen cerco oscuro.

Procede dar cifras aproximadas de potencia necesaria y consumo anual de energía. En el túnel de la Croix Rousse el alumbrado está asegurado por

un grupo de 60 Kw. para el general y dos de 110 Kw. en cada boca para los refuerzos; total, 280 Kw. y el consumo anual puede calcularse en él 2 000 horas del máximo, o sean 560 000 Kw./h. Como una *aproximación* para *tanteos*, se pueden tomar $(560\,000 : 1\,752 \times 14,50)$ Kw./hora/m.² = 22,7 Kw./hora/m.². Puede *afinarse* teniendo en cuenta los distintos grados de iluminación en las entradas; tendremos así (Croix Rousse):

$$2 \text{ entradas} = (\text{Superficie}, 14,50 \times 300) \text{ m.}^2.$$

$$\text{Consumo}, 440\,000 \text{ Kw./h.}$$

$$\text{Idem por m.}^2 = 440\,000 : 4350 = 100 \text{ Kw./h.}$$

$$\text{Zona general} = 1752 \times 14,50 \text{ m.}^2 = 25,404 \text{ m.}^2.$$

$$\text{Consumo}, 120\,000 \text{ Kw./h.}$$

$$\text{Idem por m.}^2 = 4,8 \text{ Kw./h.}$$

Por consiguiente, el consumo de energía para alumbrado en un túnel cualquiera, revestido con piezas claras de gris brillante, será:

$$(100 \times 300 \times a. \text{ Kw./h.} + 1. a. 4,8 \text{ Kw./h.} = \\ = (30\,000 + 4,8 l.) a.$$

$$l = \text{longitud total del túnel.}$$

$$a = \text{ancho total.}$$

El cálculo del consumo por metro cuadrado, bien se nos alcanza que no es exacto, pero es sencillo de aplicar, y da un orden de magnitud supuesto el escalonamiento de intensidades como indica el gráfico.

III. Ventilación.

En un túnel para carretera no debe existir ningún punto de su sección en la que el porcentaje de C.O. gas tóxico rebase a 2,5/10 000; pero si se quiere una atmósfera clara y limpia, hay que ir a 1/10 000 C.O. El problema estriba, por consiguiente, en inyectar aire puro, extraer el viciado o ambas cosas a la vez, de modo que la condición de porcentaje máximo 1/10 000 de C.O. se cumpla.

La producción de óxido de carbono es intensa por la combustión de la gasolina, 500 litros de gas por litro de combustible. Para el Hollan Tunnel se tomaron las cifras siguiente de producción de C.O. por minuto y a una velocidad de 16 Km./hora.

Turismos	28 l.
Camiones	70 l.

Cifras exageradas porque la velocidad es muy pequeña y con los motores actuales la producción de C.O./minuto es menor, puede calcularse que el resultado real de un cálculo con esa base es 2/3 del teórico; es decir, que si se fija como máxima la proporción de 2,5/10 000 de gas tóxico, la que se obtiene es poco diferente de 1,5/10 000. No pretendemos calcular aquí la ventilación de un túnel

tipo, es cuestión muy complicada, influyen múltiples factores, el problema ha de ser sometido a especialistas (*especialistas* de verdad). Para el túnel de la Croix Rousse se acudió a M. Fortier, profesor de Mecánica de flúidos de la Facultad de París, hoy el Ingeniero Encargado de aquél, Mr. I. Olivier, ha llegado a un método de cálculo resultado de sus estudios; en caso preciso se le pedirían datos, que en breve aparecerán en forma de trabajo completo en los "Annales des Ponts et Chaussées".

Consideramos útil exponer los sistemas de ventilación existentes, ya que de ello se deducen enseñanzas y constituyen datos para enjuiciar una propuesta que se formule. Resumiremos la base fundamental de todo sistema de ventilación del modo siguiente:

Condición necesaria: Introducir en el túnel una cantidad tal de aire puro que, en los momentos de mayor tránsito y sean las que sean las circunstancias atmosféricas del exterior, se pueda producir una dilución de 1/10 000 del C. O. producido.

Condición suficiente: En todos los puntos de una sección cualquiera del túnel, el porcentaje de C. O. no debe rebasar 1/10 000.

Sistema eficaz: Insuflación y distribución de aire puro.

Sistema de ventilación longitudinal. — El sistema más sencillo de ventilación de un túnel es el natural, es decir, prescindir de la ayuda mecánica, tal como ocurre en los de ferrocarril. Se deduce por la ausencia de gasto y es tentador en el caso en el que las bocas están a muy distinto nivel; parece que el túnel ha de funcionar como una chimenea, pero éstas, a veces, *no tiran*; si el tránsito justifica el túnel, es necesario el *tiro forzado*, la ventilación mecánica.

En el túnel de St. Cloud se emplea el sistema de ventilación lineal, mediante un pozo central por el que se extrae el aire viciado, las características de aquél son las siguientes:

Longitud	850,00 m.	:
Número de vías de circulación	5	
Gálibo transversal por vía ...	3,00 m.	
Diferencia de nivel entre las bocas	81,30 — 59,43 = 21,87 m.	
Punta de tráfico	5 000 vehículos/hora.	

Los estudios, realizados demostraron que en el tráfico máximo bastaban cinco minutos para elevar el porcentaje de C.O. en el túnel a 4/10 000, ya molesto y peligroso si por cualquier incidente la permanencia en esa atmósfera se prolonga un poco. Por otra parte, se apreció que los períodos en los que la velocidad del aire en el subterráneo era inaprecia-

ble (igual o menor a 0,25 m./1") son muy frecuentes; por tanto, se acudió a la ventilación artificial, que se designa por el Ingeniero Jefe de Seine et Oise, como *longitudinal simplificada*.

Se ha dispuesto un pozo aspirador de aire viciado en el centro del túnel, el ventilador aspirador se mueve por un motor eléctrico (hay otro de reserva) que puede desarrollar potencias de 12, 20, 52 y 125 CV., con lo que el acoplamiento de la ventilación al tránsito es suficientemente flexible; la hélice gira a velocidades comprendidas entre 30-80 revoluciones por minuto, y el aire aspirado varía de 200 a 600 m.³ por segundo; la velocidad máxima del aire es de 2,70 m./1", que no molesta en absoluto.

El resultado práctico es mediano; bajo el pozo la atmósfera está muy cargada, huele demasiado a gas-oil; no se respira bien, se nota que se está en un túnel. Hay instalados unos analizadores automáticos del aire que transmiten a unos indicadores el porcentaje de C.O. Los indicadores están duplicados, uno en la sala de máquinas del ventilador y otro en la oficina del túnel, situado en la entrada lado derecho. Los indicadores, si el porcentaje de C.O. llega a un límite peligroso, ponen en movimiento una señal de alarma y se corta el tráfico por el túnel, lo que sucede algunas veces, naturalmente cuando aquél es mayor y mayor es la perturbación.

Por lo expuesto se ve que la ventilación lineal puede cumplir la condición necesaria, no la suficiente, y además no hay que fiarse del *tiro natural*.

Sistema de ventilación semitransversal. — El aire limpio entra todo a lo largo del túnel (o sale el viciado), el circuito se cierra por la sección del mismo. Se ha utilizado:

En el túnel de Liverpool bajo el Mersey.

En el túnel de Pasadena (U.S.A.) bajo un canal marítimo (Houston).

El sistema necesita una gran potencia, puesto que el suministro de aire fresco se hace por una conducción análoga al dispositivo de riego de un tanque y hay que tener una presión relativamente elevada para vencer todas las pérdidas de carga y asegurar un suministro constante a lo largo de todo el túnel. El funcionamiento del sistema consiste, en esencia, en elevar la presión interior del túnel, lo que produce un escape por las bocas (o bocas y pozos); las pérdidas de carga son dobles o triples de las que existen en el sistema transversal, del que nos ocuparemos inmediatamente.

Para terminar con el sistema semitransversal, citaremos la tentativa de extraer el aire viciado en lugar de inyectar aire puro, no es viable; en las proximidades de las bocas se aspira aire puro, que no pasa al centro, se llega a demostrar que el porcentaje de C.O. crece según una ley logarítmica de cero a infinito, desde las bocas del túnel al centro.

Sistema de ventilación transversal. — Es el más moderno y se ha empleado en los siguientes túneles:

América:	Túnel de Nueva York.
»	» de Oakland.
»	» de Boston.
»	» de Detroit.
Europa:	» de Amberes.
»	» de Róterdam.
»	» de Lyon.

El fundamento del sistema es el cierre del circuito de ventilación en todas y cada una de las secciones del túnel, se insufla aire puro y se extrae el viciado; es el sistema que cumple las condiciones necesaria y suficiente, además el más eficaz. De los túneles en los que se emplea hemos visto con todo detenimiento el de la Croix Rousse (Lyon), cuya sección esquemática se ve en la figura 2.^a: los conductos de ventilación van en la parte superior de la sección porque ha sido posible la construcción de pozos situados como indica la figura 3.^a. El aire puro se suministra por la parte inferior, el viciado se aspira por la superior; a ese fin hay dispuestos unos *buzones* que en realidad suponen una función continua;

el resultado es magnífico, la atmósfera en el túnel es perfectamente clara, no se nota la estancia en subterráneo.

A título de información presentamos secciones de otros túneles (figs. 4.^a) en las que se pueden ver diferentes soluciones de las canalizaciones de aire puro y viciado.

Respecto a potencia precisa podemos señalar que en el túnel de la Croix Rousse, la máxima es de 550 Kw., los motores pueden dar una escala de potencias, mediante poleas de diámetro variable y correas de sección trapezoidal. Una disposición muy interesante es la adoptada para evitar la duplicidad de motores y ventiladores en cada pozo, es la que permite que aun con un pozo fuera de servicio la ventilación es eficaz; resulta más económica que la duplicidad de mecanismos. La *punta* de tráfico prevista es de 4.000 vehículos hora. Señalemos la coincidencia de la capacidad calculada por vía de circulación: 1.000 vehículos hora.

Finalmente insertamos unas reglas de proporcionalidad que pueden dar idea, por tanteos, de las potencias y secciones necesarias en un momento dado (órdenes de magnitud).

En un túnel dado se pueden aplicar las leyes de semejanza en cuanto a los regímenes de movimiento del aire, sea utilizando como parámetros el tránsito

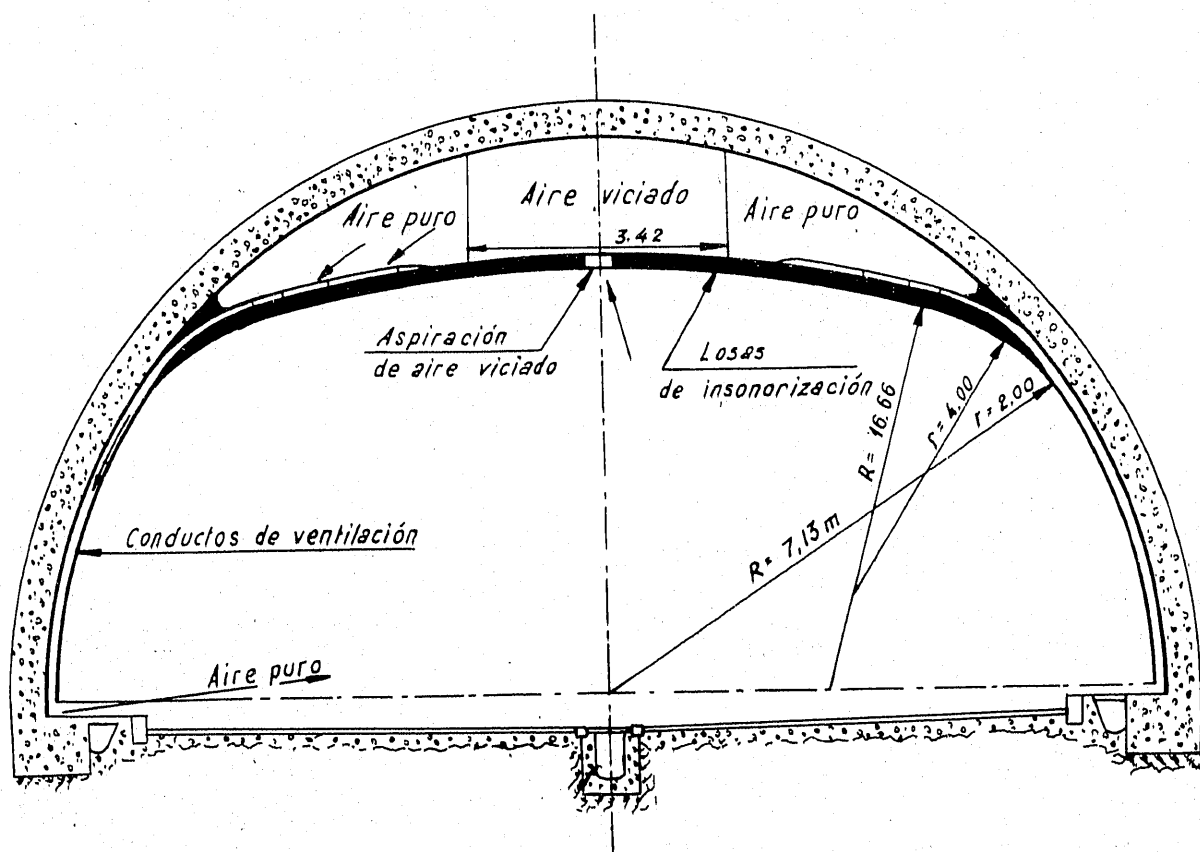


Figura 2.^a

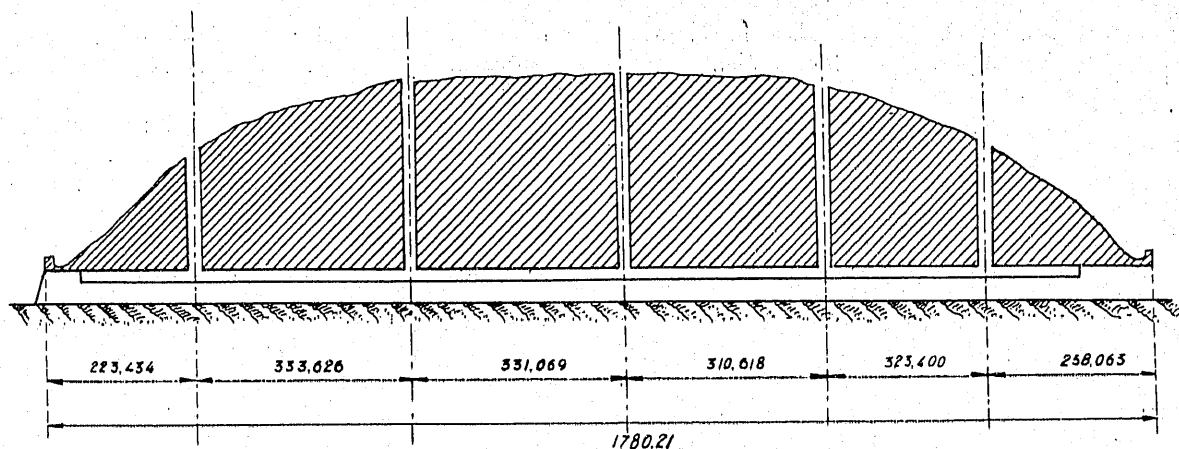


Figura 3.ª

o la cantidad de aquél suministrado. Por tanto, es útil (y sencillo) reducir el cálculo a la situación de ventilación máxima (o tráfico máximo).

Las pérdidas de carga del aire en los conductores es proporcional a su longitud, sensiblemente al cuadrado de la sección, las ocasionadas por turbulencia en los puntos singulares lo son exactamente al cuadrado de la velocidad.

Si las secciones de los conductos de aire son iguales en dos túneles, las potencias necesarias están en la relación del cubo del tráfico para longitudes iguales.

Se aprecia inmediatamente el interés que hay en *seccionar* el túnel a los efectos de la ventilación, veá-

moslo con unos números: sea un túnel de 3 000 m. de longitud; lo dividimos en seis secciones de 500 m.; la potencia que hay que instalar en cada acometida de aire será, no la sexta parte, sino $(0,5^4 : 3^4) \approx 0,01$ por exceso, o sea 16 veces menor que la que ofrece la simple operación aritmética; por ello es factible y económico disponer las cosas de tal modo que aun con 5 secciones en funcionamiento se pueda circular en lugar de *doblar* seis motores y seis ventiladores. Aquella solución, unida a una existencia completa de piezas de recambio reduce las interrupciones al mínimo; el problema del seccionamiento del túnel sólo puede resolverse en el terreno y en cada caso la solución será distinta.

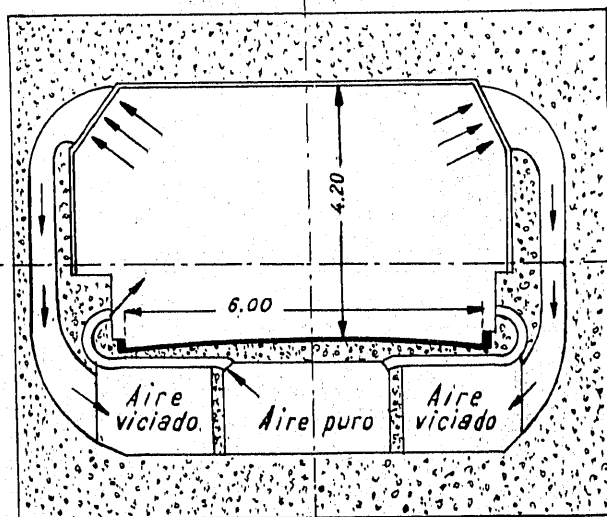
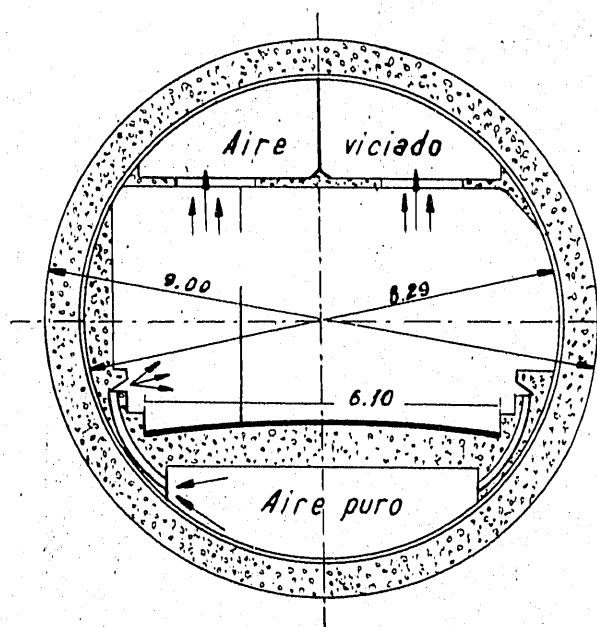


Figura 4.ª

IV. Pavimento.

El pavimento de un túnel debe ser, por su carácter como éste, definitivo; de ordinario, y salvo caso de guerra o maniobras militares, admitido que sólo utilicen el túnel vehículos con neumáticos, caben dos soluciones para pavimento: hormigón vibrado y adoquín; cualquiera de ellos es prácticamente *eterno*; no pensamos en tipos de firme a base de hidrocarburos porque su color negro es el menos apropiado para un lugar donde la iluminación cuesta mucho dinero. Colocados en España, no vacilamos en estimar el mejor el adoquín *mosaico* sobre hormigón; requiere más mano de obra que el vibrado, pero su ejecución es corriente aquí.

Por otra parte, el pavimento de mosaico es independiente de la calidad del cemento; hemos visto, además, que tanto en el túnel de St. Cloud como en el de la Croix Rousse se ha utilizado ese tipo, y el primero está a la entrada de la autopista del Oeste, cuyo firme es de hormigón; la experiencia ajena aconseja no tratar de introducir novedades; el camino trillado será más vulgar pero es más seguro. El despiece del mosaico puede hacerse individual para cada vía de circulación en arcos, parece que es lo más adecuado.

V. Revestimiento insonoro.

El ruido es uno de los agentes que más alteran los estados fisiológico y psicológico del hombre; en un taller el obrero *no oye* su máquina, le aturden las de los demás; aun suponiendo que nada más fuese molesto hay que suprimirlo o, por lo menos, atenuarlo; que cada conductor oiga su coche, pase; pero hay que imaginarse lo que son 60 ó 70 vehículos en un túnel.

El problema está resuelto de un modo completamente satisfactorio mediante un revestimiento de elementos de hormigón moldeado con cámaras absorbentes de ondulaciones sonoras de distintas frecuencias, 1 000, 3 000 y 8 000, por ejemplo; esas cámaras están en comunicación con el túnel. En la Croix Rousse hemos podido comprobar el magnífico resultado de ese revestimiento; situados en el andén (de 1,00 m. escaso) se ve avanzar una moto y no se la oye, sólo se perciben las explosiones del escape en un recorrido de 20 m. antes y después de pasar frente a nosotros.

En cualquier túnel hay que hacer lo propio, y como en los casos de la iluminación y ventilación se recurrirá a especialistas.

VI. Instalaciones de seguridad.

Son necesarios muchos servicios: teléfono, apartaderos, refugios, balizamiento y extinción de incendios; nos ocuparemos tan sólo de los dos últimos, los otros se han de proyectar de modo que cumplan su misión, sin escatimar gasto; ha de haber comunicación a lo largo de los puestos de servicio en el túnel, con las casas de máquinas, oficina técnica en el mismo y Policía son servicios de socorro para vehículos y personas (no olvidar caretas antigás) debe poder apartarse uno de aquellos que sufra una avería, acogerse el personal de servicio o los pasajeros de un coche averiado, etc., planteados los problemas *generosamente*; con sentido de la realidad, su solución no ofrece dificultad alguna ni es preciso dar reglas.

BALIZAMIENTO INTERIOR.

El túnel, que es un punto singular de la carretera, en el que el tránsito ha de regularse perfectamente, requiere un balizamiento interior análogo al *block system* de los ferrocarriles a fin de que en cualquier momento se pueda reducir la velocidad de los vehículos, ordenar su detención o cortar el paso por el subterráneo. A este fin se colocarán señales luminosas en las dos bocas y cada 200 m. en su interior tendrán tres apariencias: amarilla, paso libre; verde, precaución; roja, alto; el funcionamiento será de mando manual y doble; la situación de las señales se repetirá en un cuadro en la casa de máquinas o en la oficina (o en ambos lugares). La corriente eléctrica de este circuito será suministrada por una batería de acumuladores; en ningún caso se puede admitir que haya interrupciones de servicio.

El personal de vigilancia, desde un punto dentro del túnel podrá maniobrar las señales; en vista de incidentes o accidentes en el tránsito, la situación de aquéllas se *repita* en un tablero de la casa de máquinas; recíprocamente desde ella se puede seccionar el túnel y la maniobra queda repetida en el puesto central de vigilancia.

SERVICIO CONTRA INCENDIOS.

Este es un servicio para el que todas las previsiones son pocas y hay que considerar dos aspectos: extinción y auxilio a los usuarios.

Para el primer servicio, en todos los refugios y apartaderos habrá extintores de gran capacidad a disposición de los usuarios, protegidos como es cos-

tumbre a fin de que quede constancia de su uso; naturalmente los extintores han de ser revisados constantemente con objeto de que no suceda el tener que usarlos y que no funcionen. El servicio de extintores debe ser complementado con una conducción de agua a presión a lo largo del túnel con sus correspondientes hidrantes, situados a la distancia precisa para ser utilizados con las mangas de que se disponga; el suministro de agua estará asegurado por un depósito que *siempre* estará lleno. En la Croix Rousse la tubería es de 125 mm. de diámetro.

Para enjuiciar la magnitud de las precauciones necesarias citaremos un caso ocurrido en el "Holland Tunnel": arde un camión; para tratar de localizar el humo, se extrae aire viciado en el tramo del incendio, suspendiendo la inyección del puro, y en los contiguos se opera al revés; no obstante, *todo el túnel* se llenó de humo y hubo que entrar en él con máscaras a sacar a los usuarios. Entendemos que todas las medidas de previsión son pocas; es neces-

rio apartarse del criterio de tomar pocas o ninguna, en espera de que ocurra una catástrofe y entonces, en *caliente, pasarse de rosca* en materia de instalaciones contra incendios.

El auxilio a los usuarios debe ser rápido y eficaz en caso de accidente ordinario; una ambulancia con preferencia de paso basta, con su complemento de botiquín en las bocas. Si imaginamos un caso de incendio, hay que considerar la situación de los coches que van tras el que arde y la de los que se detienen de la fila que va en sentido contrario, acaso puedan maniobrar y salir, pero no es fácil que ante la espectacularidad de un incendio todos los conductores y pasajeros conserven la serenidad suficiente para maniobrar con orden; lo más probable es que la precipitación tapone el túnel; es preferible prohibir aquélla y que los equipos de socorro con caretas antigás para ellos y los usuarios sean los que organicen la extinción y el salvamento, pero siempre con medios suficientes.