

22) LAUREANO CORNEJO ÁLVAREZ

Jornadas sobre seguridad en Madrid 9 y 10 de Marzo de 2000.

Publicación:

“La Seguridad en la explotación de túneles carreteros”.



Ministerio de Fomento
Dirección General de Carreteras



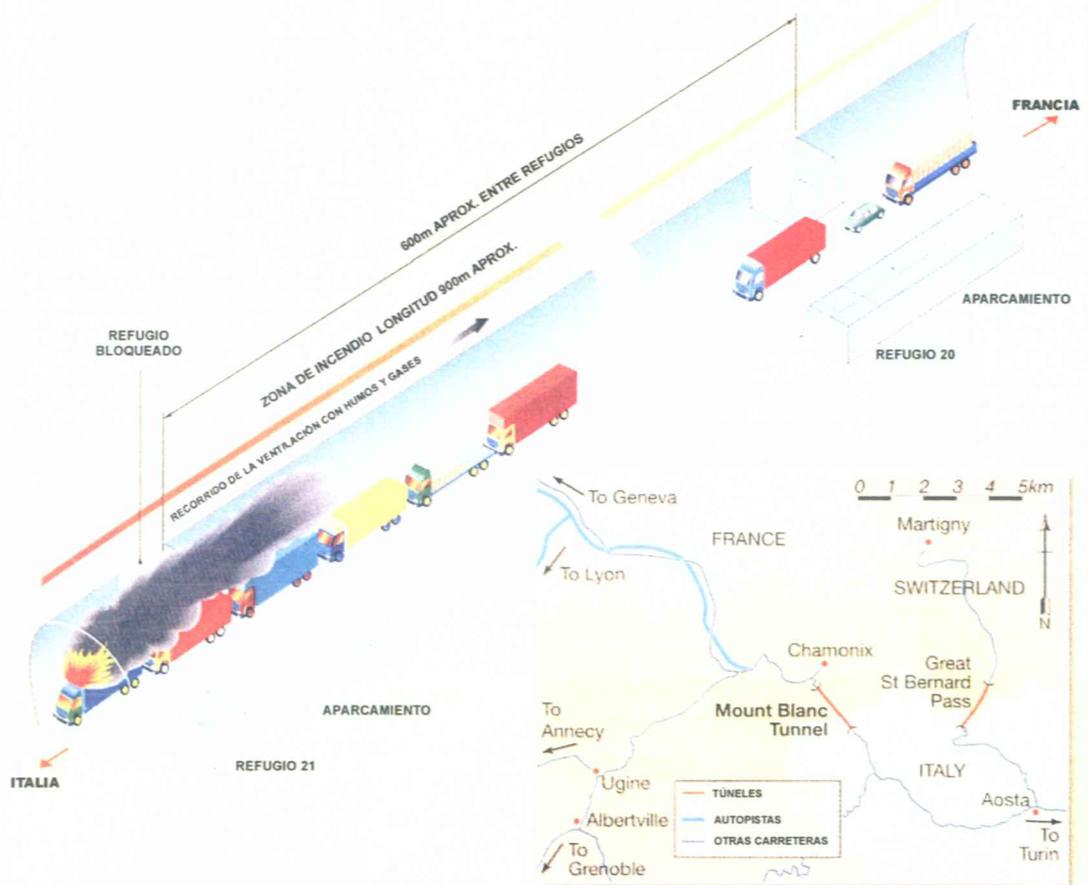
ASOCIACIÓN ESPAÑOLA
DE TÚNELES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS



Asociación Técnica de Carreteras

JORNADA SOBRE "LA SEGURIDAD EN LA EXPLOTACIÓN DE TÚNELES CARRETEROS"

Madrid, 9 y 10 de Marzo de 2000



Laureano Cornejo Álvarez



LA SEGURIDAD EN LOS TÚNELES

OBJETIVO PREFERENTE

1. INTRODUCCIÓN

Los recientes y muy graves accidentes ocurridos en los túneles de carretera del Montblanc, entre Francia e Italia y del Tauern en Austria, en el corto espacio de tiempo de unas semanas, han centrado la atención y por qué no decirlo, han despertado cierta inquietud en la opinión pública sobre la seguridad que ofrecen los túneles.

Quizá éste sea el momento más adecuado para reflexionar sobre la seguridad en los túneles y para promover el estudio y análisis de las causas que provocan los accidentes y de las acciones que deben emprenderse para que su frecuencia y gravedad se mantengan, en todo momento y situación, en niveles aceptables.

Con esta intención intentaremos identificar qué situaciones hacen que aumente el nivel de riesgo en un túnel, cómo tratar de evitar que se produzcan y con qué medios combatirlas eficazmente, una vez que se han originado, para reducir la gravedad de sus consecuencias en pérdidas de vidas humanas y daños materiales.



2. CONCEPTO GENERAL DE SEGURIDAD Y DE RIESGO

Decimos que una actividad humana es segura, cuando se realiza sin riesgo para la integridad de la persona.

Sin embargo, ninguna actividad humana es totalmente segura; la seguridad total es un “desideratum” inalcanzable.

Cualquier actividad humana, incluso la propia vida del hombre, comporta un riesgo inherente.

Podemos definir el riesgo como la probabilidad de que un determinado accidente, (10 muertos en un único accidente) se produzca.

Cuanto mayor es la probabilidad de que un determinado accidente se produzca, mayor es el nivel de riesgo que tiene la actividad que lo provoca.

El concepto de seguridad podemos definirlo como opuesto al concepto de riesgo.

A mayor nivel de riesgo, menor nivel de seguridad. A un menor nivel de riesgo, le corresponde un mayor nivel de seguridad de la actividad realizada y diremos, por tanto, que ésta es más segura.

No todas las actividades que realiza el hombre entrañan el mismo riesgo.

Cada actividad tiene su nivel de seguridad y, por tanto, su nivel de riesgo.

Pilotar un avión de combate entraña mucho mayor riesgo que conducir un coche.



En la etapa de proyecto del enlace ferroviario bajo el Canal de la Mancha, se calcularon los riesgos para los distintos medios de transporte, considerando una distancia equivalente de 108 Km., los riesgos calculados fueron:

Medio de transporte	Probabilidad	Nivel de Seguridad
Coche	1 entre 2.500.000	1
Avión	1 entre 11.000.000	4,4
Trenes existentes	1 entre 13.000.000	5,2
Sistema ferroviario del Canal de la Mancha	1 entre 30.000.000	12

Según estos datos, el avión, para este trayecto considerado, tiene un nivel de seguridad 4,4 veces superior que el coche, y el enlace ferroviario diseñado bajo el Canal de la Mancha, un nivel de seguridad 12 veces mayor que el coche.

Esta aceptación del riesgo por parte del hombre, que es inherente a su naturaleza, promueve, sin embargo, el continuo progreso de la humanidad.

El hombre trabaja denodada y continuamente por mejorar sus condiciones de vida, aceptando, a la vez, correr un riesgo para conseguir este objetivo irrenunciable.

Diremos que para cada actividad hay un nivel de seguridad aceptable y, por tanto, de riesgo asumible. Sin embargo, el nivel de seguridad aceptable para una determinada actividad, no es siempre el mismo. Lo que hoy se considera para una determinada actividad un nivel de seguridad aceptable, puede ser inaceptable dentro de diez años.

La sociedad demanda cada vez mayores niveles de seguridad como una exigencia de su propio bienestar y de un mayor aprecio a la vida de los individuos que la componen.



Por otra parte, el constante incremento cualitativo y cuantitativo de la actividad humana, amenaza continuamente los niveles de seguridad deseados, como consecuencia del incremento de los niveles de riesgo.

Para neutralizar este aumento de los riesgos, se hace necesario diseñar y poner en práctica acciones encaminadas a rebajarlos. Este es el objeto de la seguridad. Podemos, por tanto, definir la seguridad *como la disciplina dirigida a disminuir los riesgos que comporta al hombre el desempeño de su actividad diaria.*

3.- LA SEGURIDAD Y EL RIESGO EN LOS TÚNELES

3.1.- EL NIVEL DE SEGURIDAD

La conducción de un vehículo por una carretera entraña un riesgo. El nivel de riesgo depende de múltiples factores como: características de diseño de la carretera, características del tráfico, factores meteorológicos, factores relativos a las aptitudes y condiciones del conductor, así como de las características y del estado del vehículo.

De todas estas concausas, las que ahora vamos a considerar son las derivadas de las características de diseño de la vía de comunicación y de los factores externos.

En un túnel, el nivel de seguridad es menor que en un tramo equivalente en espacio abierto, para las mismas condiciones de tráfico, si no se adoptan las acciones adecuadas. Esta disminución de la seguridad en los túneles, se produce como consecuencia principalmente de factores como: la ausencia de luz y de atmósfera naturales, el espacio limitado y el efecto “agujero negro”. Estos factores tienden a aumentar la probabilidad de que se produzcan accidentes en un túnel, y de que estos accidentes sean más graves como consecuencia de las mayores dificultades de evacuación y rescate.

Ahora podemos hacernos la siguiente pregunta *¿cuál debe ser el nivel tolerable de seguridad en un túnel?* La respuesta en términos relativos sería: *el nivel de seguridad en un túnel debe ser el mismo que el que tiene un tramo equivalente en espacio abierto de la vía de comunicación a la que pertenece.*

El nivel de riesgo en las carreteras, puede establecerse según diferentes criterios; un criterio usado frecuentemente es el del número de *mue*rtos/año.



Este criterio se puede establecer en forma global para toda la red viaria o para una ruta o área determinadas.

Recientemente se ha diseñado en Suecia el tramo viario con túneles Essingeleden-Norra-Södra Länken con un nivel de riesgo de 0,0033 muertos/10⁶ (vehículos · Kilómetros), lo que supone, para la longitud total del tramo, 2,1 muertos/año.

Todos los gobiernos tienen entre sus prioridades, reducir el número de muertos por accidentes de tráfico en sus vías de comunicación. Algunos países como Holanda, se han propuesto, dentro de esta prioridad, el objetivo ambicioso de reducir a la mitad el número de muertos/año entre los años 1986 y 2010.

Conseguir un objetivo tan ambicioso, exige diseñar y construir nuevas vías de comunicación con un menor nivel de riesgo que el de las ya existentes.

Las inversiones en seguridad, de estas nuevas vías de comunicación y, principalmente en túneles, deberán ser incrementadas notablemente. A título de ejemplo citaremos el de los proyectados túneles gemelos de Westerschelde en Holanda, en los que la inversión en seguridad (ventilación, galerías de conexión, sistemas de emergencia, ...) se ha estimado en 350 M sobre una inversión total para construir los túneles de 1.180 M de Florines Holandeses, lo que representa una inversión en seguridad del 30 %.

La seguridad en los túneles es un concepto más difícil de evaluar por su componente de apreciación subjetiva. Aunque el número de accidentes es incluso menor que en tramos equivalentes en espacio abierto, la gravedad de algunos accidentes que se producen en los túneles, como los recientemente ocurridos en los túneles del Montblanc (41 muertos) y Tauern (12 muertos), es mucho mayor, provocando una gran sensibilización en la opinión pública, percibiendo ésta que existe una menor seguridad en los túneles, lo que no se corresponde con una apreciación más objetiva.

Como quiera que estas percepciones emocionales del hombre, en su apreciación de la seguridad, deben ser tenidas en cuenta por su importancia, se hace necesario diseñar y construir los túneles de modo que los accidentes muy graves tengan una baja probabilidad de que se produzcan en relación con los accidentes con un menor número de muertos.

Recientemente, en los túneles gemelos de Westerschelde en Holanda, ya citados, se han diseñado instalaciones, conexiones, rutas de evacuación, sistemas de emergencia, etc., de modo que para un único accidente con 10 muertos, su probabilidad sea $p=10^{-4}$ (km.año), y para un único accidente con 100 muertos, la probabilidad sea 100 veces menor $p=10^{-6}$ (km.año)

El nivel de riesgo y por tanto de seguridad, de un túnel, se ve afectado por múltiples factores como:

FACTORES QUE AFECTAN AL NIVEL DE RIESGO

Factores intrínsecos

- Trazado
- Longitud
- Gálibo
- Situación del túnel (urbano, interurbano, submarino, subfluvial, ...)

Factores extrínsecos

- a) Relacionados con el tráfico
 - Modalidad de tráfico (unidireccional, bidireccional)
 - Densidad de tráfico
 - Tasa de vehículos pesados
 - Velocidad excesiva de circulación
 - Distancia inadecuada de separación entre vehículos.
 - Nivel de equipamiento de seguridad; calidad de servicios e instalaciones
- b) Relacionados con los vehículos
 - Transporte o no de sustancias peligrosas por el túnel
 - Estado de los vehículos
 - Medidas de seguridad propias de los vehículos (extintores, ...)
- c) Relacionadas con los conductores
 - Aptitudes físicas: destreza, experiencia, ...
 - Aptitudes psicológicas: cansancio, ansiedad, estado anímico, ...

Los incidentes que mayor riesgo generan en un túnel son:

Incidentes que generan mayor riesgo:

- Los fuegos importantes (ejemplo: 1 camión TIR+2 vehículos ligeros)
- Los derrames o escapes de productos químicos líquidos o gases
- Los choques de vehículos
- Los sabotajes

Como ya hemos dicho, los túneles, independientemente de sus características y de las del tráfico que por él circula, deben ser diseñados y construidos de modo que tengan todos el mismo nivel de riesgo.

En Japón, este nivel de riesgo está establecido para todos los túneles de su territorio en 1 muerto cada 22 x 10⁶ vehículos/km.

3.2.- LA CULTURA DE LA SEGURIDAD

La Sociedad demanda cada vez mayor seguridad en todas sus actividades. Estamos asistiendo al asentamiento en ella de una *Cultura de la Seguridad*.

La Cultura de la Seguridad es la respuesta adecuada individual y colectiva que la Sociedad se da a sí misma para controlar de un modo efectivo el riesgo que conlleva la realización de sus actividades.

La cultura de la Seguridad aplicada a los túneles compromete a todos: Administración, Diseñadores, Constructores, Fabricantes de equipos, Operadores y Usuarios, a contribuir crear una concienciación y creencia colectiva *en la necesidad ética y moralmente ineludible, de procurar a los usuarios, los mayores niveles de seguridad técnica y económicamente posibles en cada momento.*

La cultura de la Seguridad no es únicamente un conjunto de conceptos teóricos, sino que tiene que estructurarse en una *Disciplina* capaz de aplicar eficazmente las acciones necesarias que permitan mantener el riesgo en los túneles en niveles adecuados.

La Seguridad como disciplina, debe implantarse mediante una estructura de gestión.

En la **Figura 1**, se propone una estructura de Gestión de la Seguridad en los túneles; en la que, un Comité de Gestión sería el impulsor de ésta.

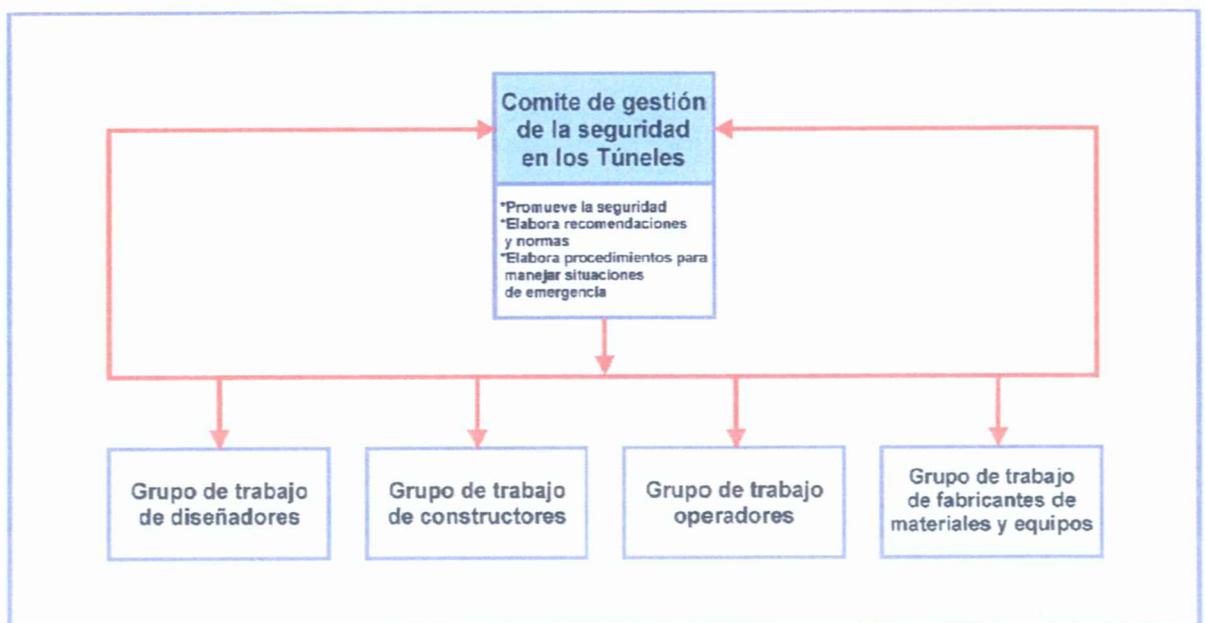


Figura 1.- Estructura de gestión de la seguridad en túneles

Entre las funciones principales del Comité de Gestión se encontrarían las siguientes:

- Promover el conocimiento y el estudio de las causas que provocan los accidentes en los túneles y el desarrollo de acciones para evitarlos.



- Fomentar recomendaciones y normas; redactar procedimientos para todas las actividades que se desarrollan en los túneles como: Ventilación, iluminación, planes de evacuación, lucha contra el fuego, planes de rescate, etc.
- Vigilar el cumplimiento de las recomendaciones, normas y procedimientos establecidos.

En el desarrollo de estas funciones estaría asistido por Grupos Permanentes de Trabajo formados por expertos de todos los colectivos profesionales relacionados con los túneles como: Diseñadores, Constructores, Operadores y Fabricantes de materiales y equipos.

Una fuente muy importante de conocimiento empírico en materia de Seguridad en los túneles, es el análisis y estudio de las causas de los accidentes producidos. La recogida de estas experiencias, debe ser puesta en común en los diferentes grupos de trabajo mediante reuniones periódicas programadas.

3.3.- LA SEGURIDAD COMO DISCIPLINA

Conseguir un mismo nivel de riesgo para los túneles y que éste sea cada vez menor, es el objetivo irrenunciable y a la vez difícil de alcanzar, de *la Seguridad como Disciplina* mediante la aplicación de un conjunto de acciones dirigidas a alcanzarlo y que contrarrestan el efecto de los factores que elevan el nivel de riesgo.

La Seguridad como Disciplina tiene, por tanto, como objetivo último, mantener el túnel con un nivel de Seguridad adecuado durante su etapa de explotación.

Sujeta a esta Disciplina, están todas las actividades y actuaciones relacionadas con el túnel en sus distintas etapas de proyecto, construcción y explotación.

Estas actividades se refieren, tanto al diseño del emplazamiento y de las características geométricas del túnel, como al diseño y construcción de los distintos



elementos estructurales que conforman la infraestructura del túnel y sus obras complementarias, así como de las distintas instalaciones que forman su superestructura, principalmente las relativas al equipamiento de Seguridad.

Asimismo se incluyen en esta Disciplina, todas las actividades y actuaciones que se realizan durante la etapa de explotación.

La seguridad estructural del túnel la aportan el sostenimiento y el revestimiento.

Las características estructurales de éstos, deben ser diseñadas de acuerdo con las solicitaciones estáticas y dinámicas que sobre ellos actúen, siguiendo las recomendaciones y normas establecidas.

La seguridad de circulación dentro del túnel, la proporcionan todos los elementos que conforman el túnel, sus obras subterráneas complementarias y su área de influencia, mediante un adecuado diseño y construcción, mantenimiento y utilización, y con la adecuada coordinación de todas las acciones que se realicen, tanto en operación normal del túnel como en caso de accidente. En la Tabla 1 se enumeran los principales elementos y acciones disponibles para mantener el adecuado nivel de seguridad.

El diseño de la **Superestructura de Emergencia de un túnel** deberá estar en consonancia con la categoría del túnel. En la normativa japonesa, los túneles se clasifican en categorías AA, A, B, C, D según su longitud e IMD. Para cada una de estas categorías, se define un Equipamiento de emergencia dimensionado para mantener el nivel de riesgo en **1 muerto cada 22×10^6 vehículos/Km**.

En Francia, el CETU (Centre d'Etudes des Tunnels), recomienda un Equipamiento de Emergencia en función del nivel de servicio del túnel (0, 1, 2) definido, para cada túnel, según su IMD, longitud y tipo de túnel (urbano, interurbano).

En la Tabla 1 se enumeran todos los sistemas que pueden formar parte de la Superestructura de Emergencia (interna y externa). La elección de los diferentes



sistemas, así como su dimensionamiento, vendrán condicionados por la categoría del propio túnel.

Cuando hablamos del túnel nos referimos, a efectos de seguridad, también a sus obras complementarias como:

OBRAS COMPLEMENTARIAS	
SUBTERRANEAS	
	<ul style="list-style-type: none">• Pozos y galerías de ventilación• Pozos y galerías de evacuación• Refugios• Ensanches
EN SU AREA DE INFLUENCIA	
	<ul style="list-style-type: none">• Areas de servicio• Aparcamientos de gran capacidad próximas a las bocas• Edificio de control• Depósitos de máquinas y equipos• Sistema de alimentación de energía eléctrica y agua• Depósito de reserva de agua• Centro de Asistencia sanitaria• Red de Saneamiento

A continuación nos referiremos, con una mayor amplitud, a los elementos y acciones que tienen una mayor influencia en el mantenimiento de esta seguridad.

TABLA 1: ACTIVIDADES, ELEMENTOS Y SISTEMAS RELACIONADOS CON LA SEGURIDAD EN EL TÚNEL

1.- Etapa de Proyecto y Construcción					
Infraestructura	Elementos funcionales	<ul style="list-style-type: none"> Situación Trazado Sección Transversal Pendientes Peraltes Gálibos 			
	Elementos estructurales	<ul style="list-style-type: none"> Refuerzos y revestimientos Drenajes 			
	Instalaciones de:	<ul style="list-style-type: none"> Agotamiento y desagüe Alimentación de energía eléctrica Alimentación de agua 			
Superestructura	Normal	Instalaciones de:	<ul style="list-style-type: none"> Iluminación Ventilación Señalización Comunicación Control y vigilancia del tráfico Control de la atmósfera del túnel 		
	De Emergencia	Interna	Sistema de Alerta y Detección	Temperatura <ul style="list-style-type: none"> Detectores de : Humos Gases 	
			Sistema de Alarma	<ul style="list-style-type: none"> Teléfonos de emergencia Botón rojo (alarma) Sistema de alarma automático conectado con los detectores Sistema de iluminación Sistema de ventilación 	
			Sistema contra Incendios	<ul style="list-style-type: none"> Bocas de incendios (agua) Bocas de incendios (espuma) Extintores de espuma Cortinas de agua 	
			Sistema de Evacuación	<ul style="list-style-type: none"> Paneles con esquema del sistema de evacuación Salidas de emergencia; señalización adecuada Rutas de evacuación; ventilación e iluminación de emergencia Extractores de gases y humos (complementarios) 	
			Sistemas complementarios de Comunicación	<ul style="list-style-type: none"> Megafonía potente Comunicación por radio Comunicación por cable 	
			Sistema de rescate Equipos Propios	<ul style="list-style-type: none"> Contra el fuego De rescate: ambulancia, equipos autónomos de respiración 	
			Sistemas de rescate Equipos Externos	<ul style="list-style-type: none"> Policía Bomberos Equipos de rescate: ambulancia, vehículos de rescate, equipos autónomos de supervivencia y rescate 	
	2.- Etapa de Explotación				
	<ul style="list-style-type: none"> Actividades de: - Control (tráfico, equipos y sistemas) - Mantenimiento y conservación (instalaciones equipos y sistemas) - Utilización y manejo de instalaciones, equipos y sistemas - Gestión integrada de todos los recursos en caso de accidente 				



3.3.1. La Ventilación.-

La ventilación en un túnel juega un papel esencial en el sistema de seguridad; su diseño ha de hacerse tomando en consideración todos los parámetros que le afectan.

La ventilación de un túnel tiene que satisfacer los siguientes requerimientos:

OBJETIVOS DE LA VENTILACIÓN

- Suministrar aire fresco y limpio para prevenir daños a la salud y efectos perjudiciales a los usuarios.
- Mantener la concentración de gases y partículas en suspensión producidos por la combustión de los vehículos, en los límites admisibles indicados por la normativa.
- Mantener la visibilidad necesaria para garantizar la seguridad del tráfico extrayendo humos y partículas emitidas por los tubos de escape de los vehículos.
- Eliminación de gases y humos calientes producidos en un incendio.

En la Tabla 2, se explicitan las normas internacionales para el control de humos y en las Tablas 3.1. y 3.2., se recogen las recomendaciones de la A.I.P.C.R. para el nivel de CO en la atmósfera del túnel y los límites de visibilidad.

TABLA 2.- NORMAS INTERNACIONALES PARA EL CONTROL DE HUMOS

International Standard	Smoke Clear Height and Obscuration Criteria	Remarks
CIBSE Guide E	<p>Typically 2-3 m. above floor level</p> <p>Visibility ≥ 8 m</p> <p>Visibility ≥ 10 m (optical density: 0.1 dB m^{-1})</p>	<p>Generally people are reluctant to proceed through smoke if the visibility is less than 8 m.</p> <p>Where there is clearly defined escape route</p> <p>60 m. is often taken as a guide of the length of travel under the smoke layer</p>
NFPA 130	<p>Sign illuminated is discernible at 9.1 m.</p> <p>Doors and walls are discernible at 6.1 m.</p>	
<p>Minimum Fire Services Installation HKFSD</p> <p>(although rail and road tunnels are not considered as buildings this technical specification is still applicable for tunnel projects)</p>	<p>Smoke free zone of 2.5 m. high is required</p> <p>Smoke free zone of 2 m. is required (from FSD Circular Letters 1996)</p> <p>Dynamic smoke extraction systems to be provided where the tunnel > 230 m.</p>	<p>Smoke free does not imply complete elimination of smoke but that visibility is not greatly impaired</p> <p>May be incorporated into the ventilating system of the tunnel and actuated by smoke detector installation</p>
Practice Notes on Control of Air Pollution in Vehicle Tunnels	<p>Visibility should be properly controlled to a level equivalent to extinction coefficient of 0.005 m^{-1} or less at any 5-minute interval</p>	<p>At 298° K and 101.325 kPa</p>



TABLA 3.1.- Recomendaciones de la AIPCR para el nivel de CO

Type of tunnel	CO at peak traffic (ppm), congested traffic or standstill
Urban tunnels (used to capacity)	
Daily congestion	100-150
Seldom congested	250
Inter-urban tunnels (highway or mountain)	250

TABLA 3.2.- RECOMENDACIONES DE LA AIPCR para los límites de visibilidad

Type of tunnel	Permissible visibility limited
	K_{lim} m^{-1}
Urban tunnel with dense rapid traffic	0.005
Congested traffic	0.009
When $K= 0.12 m^{-1}$ the tunnel must be closed	

La Tabla 4 enumera los principales contaminantes emitidos por los vehículos.

TABLA 4.- EMISIÓN DE CONTAMINANTES

CONTAMINANTES	CONCENTRACIÓN P.P.M.		
	Vehículos de gasolina (2)		Vehículos de gasóleo (3)
	CATALIZADOR		
	Sin	Con	
CO	20.000-50.000	8.400-21.000	200-4.000
NO _x	600-4.000	138-940	200-2.000
CO ₂	mayor	-	menor
SO _x	60	-	-
Hidrocarburos	10.000	1.900	300
Aldehidos	40	-	20
Formaldehidos	7	-	-
Hidrocarburos no quemados	-	-	-
Partículas sólidas (1)	-	-	-

(1) Las partículas menores de 15 micras son más perjudiciales para la salud ya que se quedan en su suspensión y pueden ser inhaladas, produciendo trastornos en la salud (alergias, asma, bronquitis). Hay dispositivos para eliminarlas de la corriente de ventilación.

(2) Los vehículos de gasolina producen más CO y CO₂ y más hidrocarburos.

(3) Los vehículos de gasóleo producen más NO_x, más nocivo incluso que el CO y también más partículas sólidas que los vehículos de gasolina con catalizador; todas éstas son sustancias cancerígenas.

En la Tabla 5 se resumen las especificaciones para el nivel de CO según distintas normas.

En la Tabla 6 se indica el campo preferente de utilización de los diferentes sistemas de ventilación según las recomendaciones de RABT, código alemán para el tráfico en túneles de carretera (1994). En ella se recomienda la ventilación transversal en túneles largos unidireccionales a partir de 6 km. Para los túneles bidireccionales, sin embargo, se recomienda en túneles a partir de los 2 km.

La ventilación longitudinal se aconseja en túneles unidireccionales de hasta 6 km, utilizando un pozo de aspiración intermedia y de hasta 4 km en túneles bidireccionales. (Fig. 2).

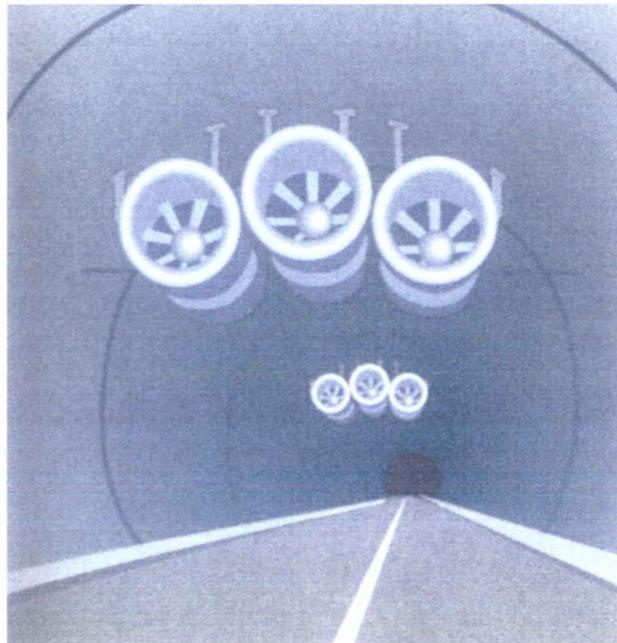


Figura 2.- Ventilación longitudinal.

La ventilación longitudinal es la más utilizada y la más económica en relación con sus costes de mantenimiento y explotación.

Actualmente su campo de utilización tiende a extenderse a túneles más largos. Cabe citar a modo de ejemplo, los túneles unidireccionales bajo la bahía de



Tokio con una longitud de 9,5 km, que tienen una ventilación longitudinal y disponen de una acera ancha (0,75 m.) y elevada 1 m. sobre la calzada a lo largo del túnel que contribuye a mejorar su seguridad y a realizar las actividades de conservación y mantenimiento sin interferir el tráfico, utilizando un vehículo especial que desliza sobre raíles.

En la Tabla 7 se resumen las ventajas e inconvenientes de los diferentes sistemas de ventilación en caso de incendio (C. Steinert).

La situación de incendio en un túnel es la de mayor riesgo, aumentando la probabilidad de daños graves humanos y materiales.

TABLA 5.- ESPECIFICACIONES DEL NIVEL DE CO SEGÚN DIFERENTES NORMAS

Standars	Carbon Monoxide Level Requirement	Remarks
CIBSE Guide E	For 5 mins exposure, 6000 ppm, incapacity 12000 ppm, death For 30 mins. Exposure, 1000 ppm, incapacity 2500 ppm, death	
NFPA 130	< 800 ppm (during smoke condition) air content $\geq 20\%$ O ₂	Based on 30 mins. Evacuation period
ASHRAE	Max. 120 ppm (137mg/m ³) for 15 min exposure time Max. 65 ppm (65 mg/m ³) for 30 min exposure time Máx. 45 ppm (45/m ³) for 45 min exposure time Max. 35 ppm(35mg/m ³) for 60 min exposure time Automatic CO detection system should be used to initiated increased ventilation and raise an alarm when CO conc. > 100 ppm	Tunnels located at or below an altitude of 1500 m (supersede) ≤ 125 ppm for max. Of 1 hr. Exposure time for tunnels located at or below an altitude of 1000 m.
Permanent International Association Road Congresses (PIARC)	For smooth traffic, Urban tunnel (daily congestion): 100-150 ppm Urban tunnel (seldom congested): 100-150 ppm Interurban tunnels (highway or mountain): 100-150 ppm For congested traffic or standstill, Urban tunnel (daily congestion): 100-150 ppm Urban tunnel (seldom congested): 150-250 ppm Interurban tunnels (highway or mountain): 150-200 ppm	At peak traffic
American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH 1994)	Threshold limit of 29 mg/m ³ for an 8-hr exposure Peak levels not to exceed 137 mg/m ³	
Environmental Protection Agency (EPA)	Exposure to a CO concentration of 40 mg/m ³ for up to 1 hr would be safe	At or near sea level
United States Environmental Protection Agency, USEPA United States Environmental Protection Agency and Federal Highway Administration, USEPA & FHWA	9 ppm for 8 hours exposure time 35 ppm for 1 hour exposure time (1998 standard from "National Ambient Air-Quality Standards") Máx. 120 ppm (137 mg/m ³) for 15 min exposure time Máx. 65 ppm (65 mg/m ³) for 30 min exposure time Max. 45 ppm (45 mg/m ³) for 45 min exposure time Max. 35 ppm (35 mg/m ³) for 60 min exposure time	(1975 standard) max. 125 ppm for exposure time < 60 min.
U.S. Occupational Safety and Health Administration	50 ppm, 8-hr TWA	
National Institute for Occupational Safety and Health	35 ppm maximum (no min. time)	
Control of Substances Hazardous to Health, COSHH Regulations Schedule EH40	50 ppm, long term (8 hr TWA) 300 ppm, short term (15 min TWA)	World Health Organisation (WHO) document Air Quality for Europe, proposes significantly reduced future levels: 8.7 ppm, long term (8 hrs) 87.3 ppm, short term (15 min)
Practice Notes on Control of Air Pollution in Vehicle Tunnels (Hong Kong Environmental Protection Department)	100 ppm for 5 mins. Average exposure time	At 25°C and 101.325 kPa (one atmosphere)

TABLA 6.- SISTEMAS DE VENTILACIÓN PARA TÚNELES DE CARRETERAS.
 Recomendaciones de RABT

Área de aplicación de los sistemas de ventilación		
Ventilación natural (con aviso de CO)	Longitud del túnel (km.)	
	Bidireccional	unidireccional
	hasta 0,4	hasta 0,7
Ventilación longitudinal con ventiladores	hasta 2	hasta 4
Con ventiladores y pozo de aspiración	hasta 4	hasta 6
Ventilación semitransversal reversible	a partir de 0,7	a partir de 2
Ventilación semitransversal	a partir de 1	a partir de 1
Ventilación transversal	a partir de 2	a partir de 6

En el diseño de la ventilación hay que tener en cuenta :

- Si son previsible frecuentes atascos (caravanas)
- Si el túnel es urbano o no
- La intensidad del tráfico estimada
- La frecuencia estimada de incendios
- Tipo de vehículos que van a utilizar el túnel, naturaleza y % de vehículos pesados, transporte de sustancias peligrosas, tiempo de restricciones
- Si hay posibilidades de escape (conexiones transversales a otras vías de escape) a una distancia apropiada mayor o igual 350 m si es posible.

TABLA 7.- VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS SISTEMAS DE VENTILACIÓN EN CASO DE INCENDIO

	Evolución del humo	Condiciones para la evacuación y la lucha contra el fuego
Ventilación natural	El humo se distribuye en capas bajo el techo del túnel. También puede difundirse en toda la sección del túnel, en una o ambas direcciones dependiendo de la corriente longitudinal que resulte del efecto pistón o del efecto exterior del viento.	Difícil de resolver teniendo en cuenta la corta longitud del túnel, las cortas vías de escape, pueden suponer unas condiciones aceptables para la lucha contra el fuego.
Ventilación longitudinal	Disponiendo de ventiladores suficientemente dimensionados (dependiendo del desarrollo del incendio), el túnel se verá afectado por el humo en el lado del sentido de la corriente.	Condiciones óptimas para la evacuación y la lucha contra el fuego en el lado del sentido de la corriente. Escape y orientación apenas posible por el lado contrario a la corriente, por tanto situación problemática en túneles bidireccionales y unidireccionales con alta probabilidad de atascos.
Ventilación semitransversal	El humo se extrae a través de un conducto en la bóveda; sin embargo el humo generalmente se propaga a ambos lados mientras se mantiene el humo estratificado; esta expansión es muy sensible a la velocidad de la corriente longitudinal.	Eficacia muy diferente dependiendo de si el humo es aspirado a lo largo del conducto o en determinados puntos próximos al fuego y de cómo se neutraliza la corriente longitudinal.
Ventilación semitransversal reversible	El comportamiento es el mismo que en la ventilación transversal.	
Ventilación transversal	El humo se extrae a través de un conducto en la bóveda, mientras el aire fresco se incorpora por la parte inferior del túnel, restringiéndose la propagación del humo a una pequeña área a ambos lados.	Alta eficacia; lucha contra el fuego posible desde ambos lados siempre que la corriente longitudinal y la entrada de aire fresco en el área próxima al fuego pueda ser interrumpida. Es posible un control fino de las corrientes longitudinales en el área alejada del fuego, sin embargo el control del sistema es complicado.

Cuando se produce un incendio se libera gran cantidad de calor, gases y humos muy tóxicos, principalmente, monóxido de carbono en concentraciones muy elevadas.

La primera preocupación debe ser eliminarlos del túnel de modo que no supongan peligro para el usuario.

Para que esto sea así, es de la mayor importancia que la detección del incendio sea inmediata (≈ 1 min.) y que los sistemas de detección del incendio pongan en funcionamiento inmediato el sistema de ventilación en régimen de emergencia.

Veamos como realizan la extracción de humos y gases los diferentes sistemas de ventilación y las ventajas e inconvenientes que presentan.

3.3.1.1.- Ventilación longitudinal

En túneles unidireccionales la ventilación longitudinal ofrece condiciones óptimas para la evacuación de humos y gases y por tanto, es eficaz en caso de incendio. Sin embargo, cabe hacer las siguientes puntualizaciones:

Los ventiladores axiales reversibles instalados a lo largo del túnel tienen que tener las características de caudal y presión necesarias para conducir los humos y gases en el sentido que sea conveniente según la situación del tráfico. En el diseño de los ventiladores hay que tener en cuenta la disminución, tanto en los caudales como en la presión, que experimentan al invertir el sentido del giro (35% en caudal, 50% en presión) y ***que el ventilador debe estar diseñado para trabajar a 150°C entre 2 y 5 horas o a 250°C durante 20 minutos.*** (Fig. 3).

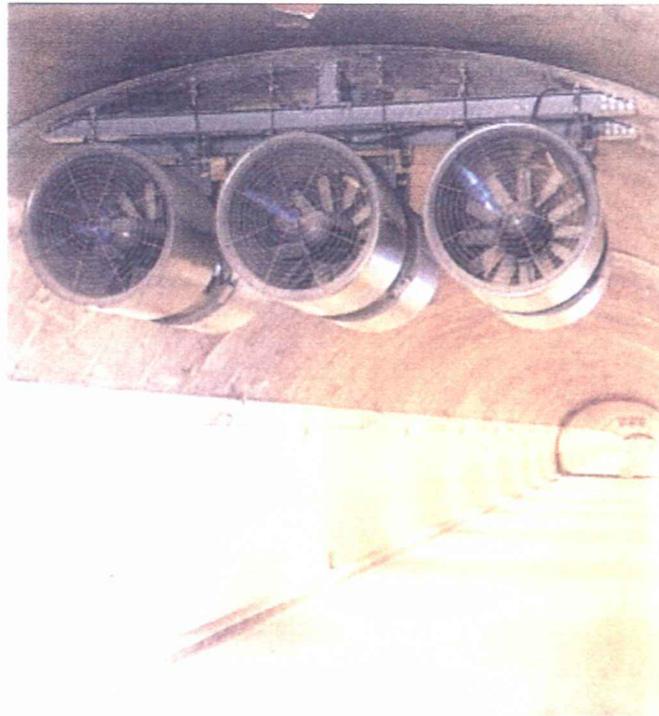


Figura 3.- Turbo ventiladores (Jet Fans)

La velocidad de la corriente de ventilación debe ser la mínima necesaria para que los humos y gases mantengan un sentido adecuado y constante de salida, evitándose así la difusión de humos y gases en toda la sección y a lo largo del túnel (AIPCR Montreal 1996) hacia la zona del tapón de vehículos originado.

La figura 4 corresponde a un ensayo con incendio provocado, mediante la combustión de petróleo en una superficie de 8 m^2 en un túnel, equivalente al incendio de un camión de 20MW de energía calorífica liberada; en una ventilación longitudinal con un caudal de $30 \text{ m}^3/\text{s}$ y una velocidad de 2 m/s , el humo y los gases se extienden a ambos lados del foco; el mismo tipo de incendio se propaga en el sentido de la ventilación, cuando ésta tiene un caudal de $60 \text{ m}^3/\text{s}$ y una velocidad de 3 m/s , produciéndose una difusión de humos y gases a lo largo del túnel.

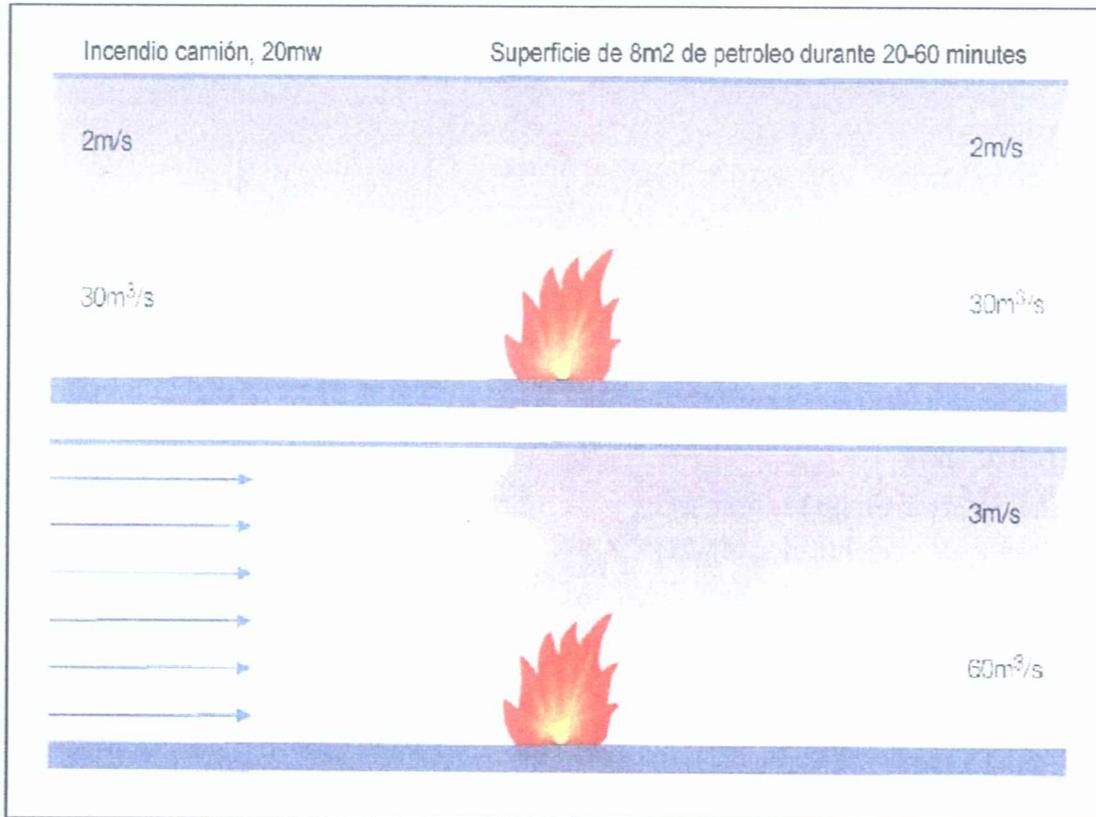


Figura 4.- Movimiento de los humos y gases en ventilación longitudinal

En otro ensayo con incendio provocado de un vehículo ligero (6MW), una corriente de aire de 0,8 m/seg. es suficiente para dirigir los humos y gases estratificados en la parte superior de la sección sin mezclarse con el aire de la ventilación. Sin embargo, para el mismo ensayo, una corriente de ventilación longitudinal de 3,4 m/s provoca la difusión completa de humos y gases, situación no deseable. (Fig. 5).



de los vehículos; estas partículas dificultan la visibilidad, siendo especialmente nocivas para la salud, las menores de 15 micras.

Estas partículas sólidas, se eliminan utilizando precipitadores electrostáticos, con lo que se reduce también el caudal de aire necesario de la ventilación.

3.3.1.2.- Ventilación semi-transversal

En la ventilación semi-transversal el humo y los gases son aspirados a través de un conducto situado en la parte alta de la sección.

Si el diseño de la ventilación es el adecuado, su eficacia para extraer los humos y gases es buena.

En régimen normal, los humos y gases son absorbidos a través de rejillas a lo largo del conducto de extracción (10-12m²).

En caso de incendio las trampillas próximas a él (entre 1 y 4 en función de las características del fuego), se abren por control remoto o de un modo automático al alcanzarse en su entorno la temperatura seleccionada para su apertura (generalmente entre 70° y 100°). Inmediatamente los ventiladores situados en las bocas extremas comienzan, simultáneamente, la extracción, en régimen forzado, de los gases y humos producidos.

La eficacia de esta extracción depende fundamentalmente de los siguientes factores:

LA EFICACIA DE LA EXTRACCIÓN DEPENDE DE:

- Rapidez de detección y apertura de trampillas
- Caudal de productos extraídos (m^3/s)
- Distancia entre trampillas, x (m) (entre 35 y 70m)
- Superficie de cada trampilla, $s(m^2)$
- Densidad de distribución de cada trampilla, s/x (entre 0,2-0,4 m^2/m)
- Forma de la trampilla, l/b
- Temperatura de activación de la trampilla, T (entre 70° y 100°)
- Posición de la trampilla en relación con el eje del túnel y el falso techo.
- Energía liberada dE/dt
- Localización del fuego en relación con la trampilla.

La temperatura (T) óptima de activación de trampillas, deberá calcularse, para cada situación realista de incendio, mediante simulación teórica.

Es de la mayor importancia mantener estratificados los gases y humos calientes en la parte superior de la sección para, primero, conseguir una máxima eficacia al extraer los gases y humos calientes concentrados y segundo, para permitir que quede una zona de la sección, en su parte inferior, con una altura (entre 2 y 3 m) con aire sin contaminar que permita la evacuación en buenas condiciones a través del túnel (Fig. 6.1 y 6.2) de las personas afectadas.

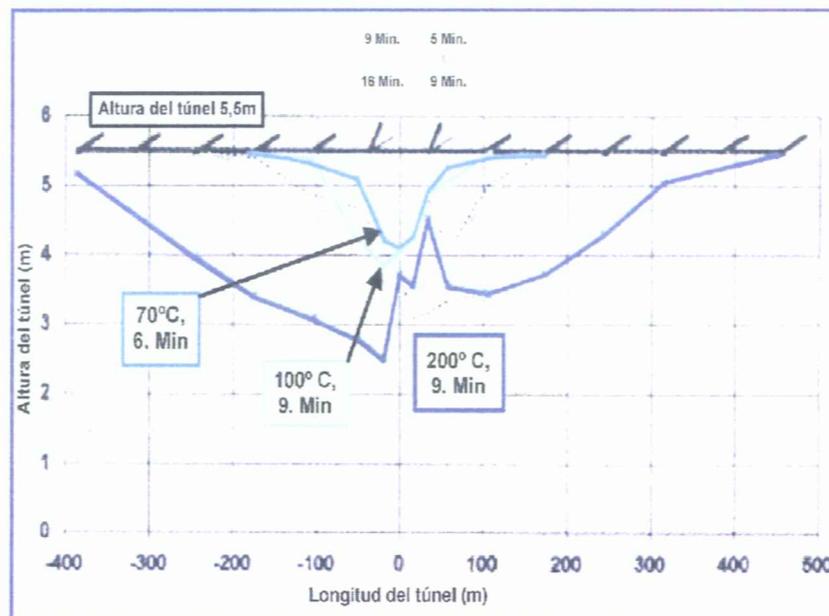


Figura 6.1.-Distribución de humos y gases calientes alrededor del foco del incendio (autobús) para distintas temperaturas de apertura de trampillas

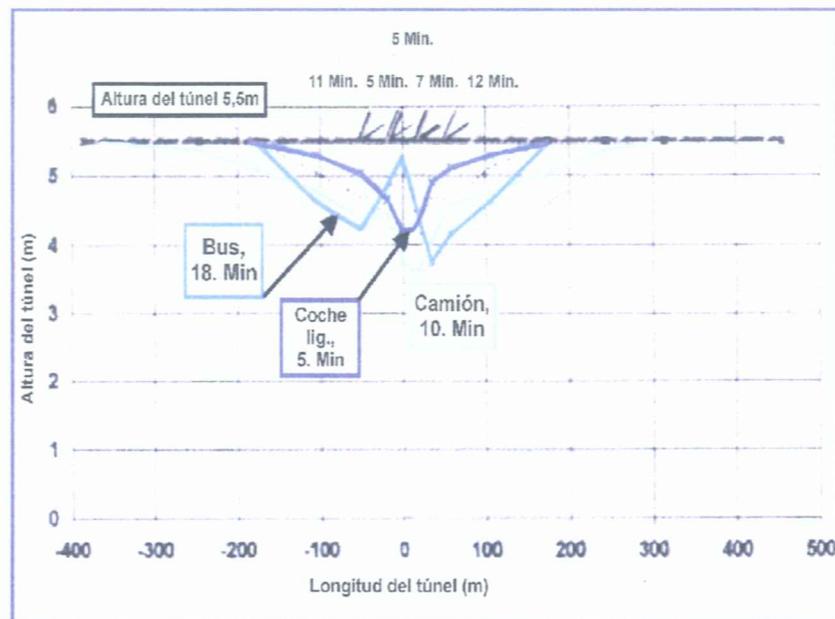


Figura 6.2.- Distribución de gases calientes alrededor del fuego provocado por distintos vehículos. Temperatura de activación 100°C

El mantenimiento de la estratificación de los gases y humos, se consigue con:

LA ESTRATIFICACIÓN DE LOS GASES Y HUMOS SE MANTIENE MEDIANTE:

- La activación inmediata de la aspiración
- La aspiración puntual, de unas pocas trampillas próximas al fuego y no de todas las trampillas a lo largo del conducto de extracción
- Un caudal de evacuación adecuado al caudal de humos y gases producidos
- La anulación de la corriente longitudinal actuante en la zona del incendio

El número de trampillas que deben aspirar en la zona próxima al fuego, depende de la energía liberada por éste. Con trampillas colocadas a 35-50 m, y con una temperatura $T=100^\circ$, el número de trampillas puede ser:



Para incendio de vehículo ligero	- entre 1 y 2
Para incendio de autobús	- entre 3 y 4
Para incendio de camión	- entre 4 y 6

Ensayos de túneles de carretera en Noruega, dentro del proyecto EUREKA (EU 494, FIRETUN 1998), han puesto de manifiesto que una corriente longitudinal de 1m/s es suficiente para producir la dispersión de humos y gases llenando de humo un amplio tramo de túnel, situación que complica sobre manera la evacuación, el rescate y la lucha contra el incendio. Esta dilución y enfriamiento de los humos y gases puede hacer que, incluso, se retrase la detección del fuego.

Durante el desarrollo del incendio es necesario conocer la velocidad y el sentido de movimiento de humos y gases, para poder adoptar las medidas adecuadas que neutralicen dicho movimiento.

El movimiento de humos y gases se produce como consecuencia de la presión de los gases calientes generada por el fuego, principalmente en el momento de mayor virulencia de éste.

También el movimiento se puede producir por el efecto pistón que genera la circulación de vehículos dentro del túnel.

Estos efectos deben ser neutralizados con la mayor brevedad posible; para conseguir este objetivo, puede ser necesario activar algunos ventiladores colocados a lo largo del túnel y que, suficientemente alejados de la zona del incendio, generan corrientes de aire que puedan contrarrestar y anular cualquier movimiento del tapón de humos. (Fig. 7)

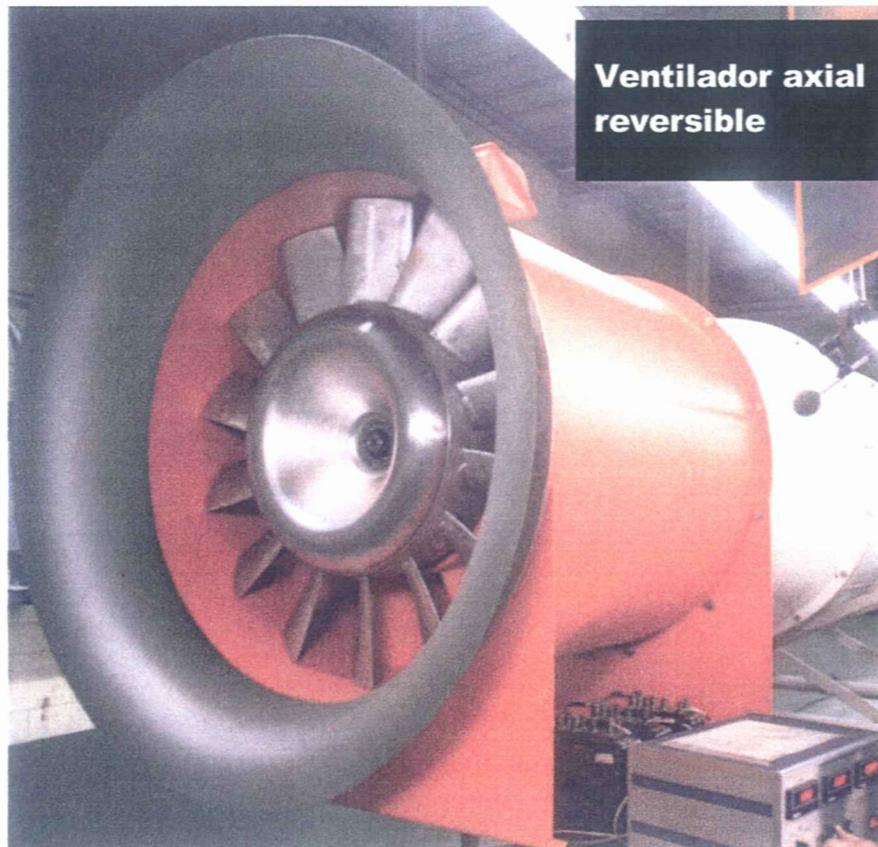


Figura 7.- Ventilador axial reversible

Un diseño adecuado de la ventilación (con los caudales y depresiones necesarias) es de la mayor importancia para que no se difundan los humos y gases en una amplia zona del túnel.

El caudal suministrado por los ventiladores de las bocas, tiene que estar en consonancia con los caudales de humo generados por el incendio.

Según las normas RABT (1994), un escenario realista sería considerar para el cálculo de la ventilación, el incendio de un camión (20MW) con un caudal de aspiración de $60\text{m}^3/\text{seg}$.

La AIPCR considera, en cambio, como escenario realista el incendio de un camión y dos vehículos ligeros (40MW) diseñando la ventilación para un caudal de



evacuación de humos y gases de $100\text{m}^3/\text{seg}$, (considerando que un vehículo ligero (10MW) produce un caudal de gases de $20\text{m}^3/\text{seg}$).

Ambos criterios, considerando los resultados de los ensayos del proyecto EUREKA, son absolutamente insuficientes. Según estos resultados el incendio de un camión TIR (100MW), generaría un caudal de gases de $240\text{m}^3/\text{seg}$., con una temperatura media de 300°C y máxima de 1.200°C .

Un incendio de esta magnitud, se puede considerar como poco probable, aunque pueden producirse incendios de mayor magnitud.

La energía calorífica para diferentes vehículos, según la ITA (International Tunneling Assotiation) es:

Energía calorífica para diferentes vehículos (ITA)

Coches: 3-5 MW

Furgonetas: 10 MW

Autobuses: 20 MW

Cisterna de gasolina (pequeña): 50 MW

Cisterna de petróleo (grande): 100 MW

Tanque de petróleo (50 m^3): 300 MW

Un escenario realista es suponer, en túneles por los que transitan vehículos pesados en una proporción significativa, un caudal de gases de $240\text{m}^3/\text{seg}$., para dimensionar la ventilación. La duración del fuego estaría entre 30 y 60 min., pudiéndose alcanzar temperaturas de 800° en 5 min.

En el diseño de los ventiladores centrífugos de velocidad variable que aspiran desde las bocas, hay que tener en cuenta que la aspiración de gases y humos calientes



reduce su eficiencia en un 50% como consecuencia de la reducción de la densidad del fluido aspirado y de la mayor viscosidad de los humos y los gases.

Una vez que se ha detectado el fuego, deben comenzar a funcionar a la vez los ventiladores extractores en régimen forzado; en caso de un caudal aspirado de $240\text{m}^3/\text{seg.}$, cada ventilador extraería $120\text{m}^3/\text{seg.}$ Estos extractores se diseñarán para trabajar al menos durante 90 min. aspirando aire, gases y humos a una temperatura de 450°C .

El conducto de aspiración y el falso techo, al igual que en la ventilación transversal, se construirán con materiales resistentes a las altas temperaturas. El falso techo debe también protegerse con materiales antitérmicos; en determinados casos, túneles subfluviales o submarinos, también se protegen los revestimientos con materiales antitérmicos mediante un doble revestimiento.

En resumen, una ventilación semitransversal puede controlar y hacerse con un incendio importante (100MW), si la ventilación está bien diseñada, se controla adecuadamente el desarrollo del incendio desde el edificio del control y se toman las decisiones acertadas en los momentos precisos. Esto exige disponer de sistemas de detección y control eficaces y contar con un personal capacitado y entrenado.

Cada túnel deberá de disponer de los sistemas de emergencia (evacuación, rescate y lucha contra incendios) adecuados y en consonancia con el nivel de riesgo estimado.

3.3.1.3.- Ventilación transversal

En la ventilación transversal, al igual que en la semitransversal, los humos y gases son aspirados y transportados a través de un conducto situado en la parte superior de la sección. (Fig. 8)

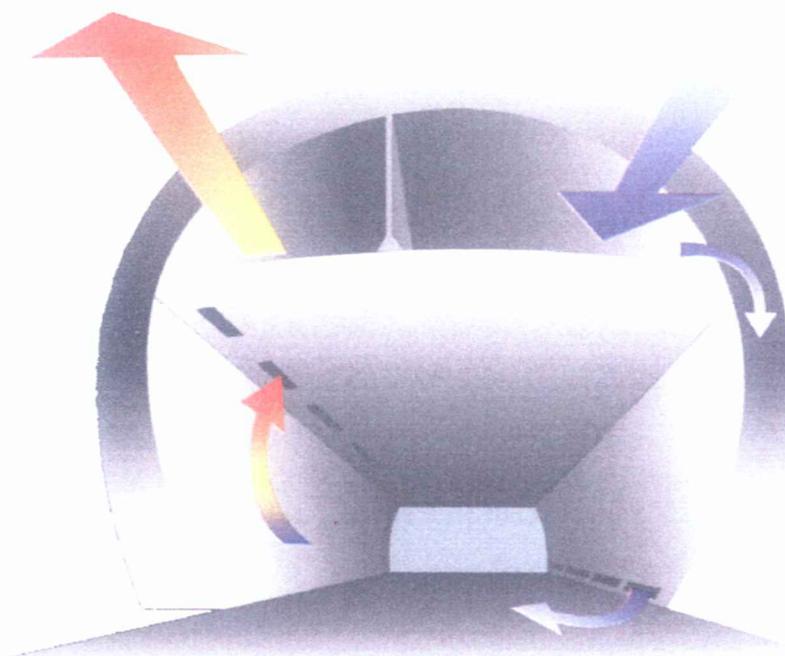


Figura 8.- Ventilación transversal

Además de este efecto de aspiración, se insufla a través de un conducto distinto aire fresco que se introduce a intervalos regulares por la parte inferior de la sección.

En teoría, el sistema de ventilación transversal es el de mayor eficacia en la lucha contra el fuego, ya que su flexibilidad permite mayores posibilidades de actuación. En la práctica, la eficacia depende de la adecuada utilización del sistema y de la rapidez de la respuesta. En relación con la ventilación transversal, cabe hacer las mismas observaciones que las realizadas para el sistema de extracción en una ventilación semitransversal. La estratificación de gases y humos y por tanto, la máxima eficacia en su extracción, se consigue cumpliendo los objetivos indicados para la ventilación semitransversal.

Cuando se produce un incendio, se genera en la zona afectada por él, una alteración de las condiciones de ventilación en régimen normal.



La existencia de corrientes longitudinales que pueden resultar contrapuestas (efecto pistón, efecto chimenea) y la existencia de turbulencias de la corriente en general, junto con la corriente que se genera en la zona del incendio, como consecuencia de la presión de los gases, son factores que pueden provocar la difusión y dispersión de humos y gases en un amplio tramo del túnel a ambos lados del incendio. Esta situación debe ser evitada por todos los medios ya que dificulta extraordinariamente la evacuación, el rescate y la lucha contra el incendio y aumenta el riesgo de que el accidente se convierta en grave.

Como es sabido, los gases producidos en un incendio dentro de un túnel, son altamente tóxicos y pueden resultar letales en muy corto espacio de tiempo por su elevada concentración de monóxido de carbono.

En la tabla 5 se especifican los niveles de CO requeridos por distintas normas internacionales.

Vemos que, según las normas NFPA 130, para un tiempo de evacuación de 30 minutos, la máxima concentración admisible es menor de 800 ppm, siempre que el contenido de oxígeno en la atmósfera del túnel sea mayor o igual al 20%. Según las normas CIBSE Gia E, las atmósferas con concentraciones de 12.000 ppm y 2.500 ppm provocan la muerte en 5 min. y 30 min de exposición respectivamente.

El control de la capa estratificada de humos y gases en la parte superior de la sección, es la acción fundamental para el control del incendio, (informe de la AIPCR Montreal 1996).

Es necesario conseguir que la corriente longitudinal en la zona del incendio sea nula, para lo cual deberá cortarse la entrada de aire fresco por la parte inferior de la sección en la zona próxima al incendio; de este modo se evitan turbulencias en la corriente que favorecen el descenso de los humos y gases a la parte baja de la sección.

Si a pesar de esta acción se detecta una corriente longitudinal, deberá ser contrarrestada poniendo en funcionamiento, a una distancia suficientemente alejada del fuego, los ventiladores axiales dispuestos para este fin a lo largo del túnel, de modo que contrarresten esta corriente.

Los ventiladores axiales reversibles colocados a lo largo del túnel, se construyen con potencias entre 2,5 y 250 KW, con diámetros en 0,3 y 3,5 m. y presiones, en varias etapas, entre 100 y 800 mm. Los caudales varían, dentro de una amplia gama, entre 280 m³/min y 1.900 m³/min.

Este tipo de ventiladores proporcionan generalmente menores caudales de aire que los ventiladores centrífugos de velocidad variable utilizados para la aspiración de humos y gases dando mayores presiones de impulsión. Se pueden instalar en serie (mayor presión) y en paralelo (mayor caudal).



Fig. 9.- Ventilador centrífugo.

Cuando exista mucha diferencia de cota entre las bocas, el control de gases y humos puede hacerse difícil (efecto chimenea). En estos casos es más eficaz *disponer de una ventilación transversal multizonal, dividida en tramos independientes* con aspiración e impulsión propias, que permiten la creación de corrientes longitudinales que equilibran el movimiento del aire en la zona de humos y gases.



Para poder actuar adecuadamente tomando las decisiones más acertadas en cada caso, el sistema de detección y control del flujo del aire en el túnel tiene que permitir medir y registrar, desde la sala de control, el sentido y velocidad de la corriente longitudinal del aire, así como su densidad, humedad y temperatura, a intervalos regulares a lo largo de todo el túnel.

La eficacia de la ventilación transversal en el manejo y neutralización de un incendio depende de varios factores que no son fáciles de gestionar adecuadamente. ***Unas instalaciones capaces, y un personal de explotación capacitado y muy bien adiestrado*** son elementos esenciales.

Los sistemas de evacuación, rescate y emergencia deberán estar en consonancia con el riesgo estimado de cada túnel, representando el adiestramiento y la coordinación de los equipos los factores esenciales en la adecuada gestión en caso de incendio.

La elección del sistema de ventilación más adecuado para un túnel es un compromiso entre las prestaciones que ofrece en relación con la seguridad y el medio ambiente y el coste/beneficio.

Para que la elección sea la correcta, debe seguirse un proceso de decisión lógica que permita comparar las diferentes alternativas (Fig. 10).

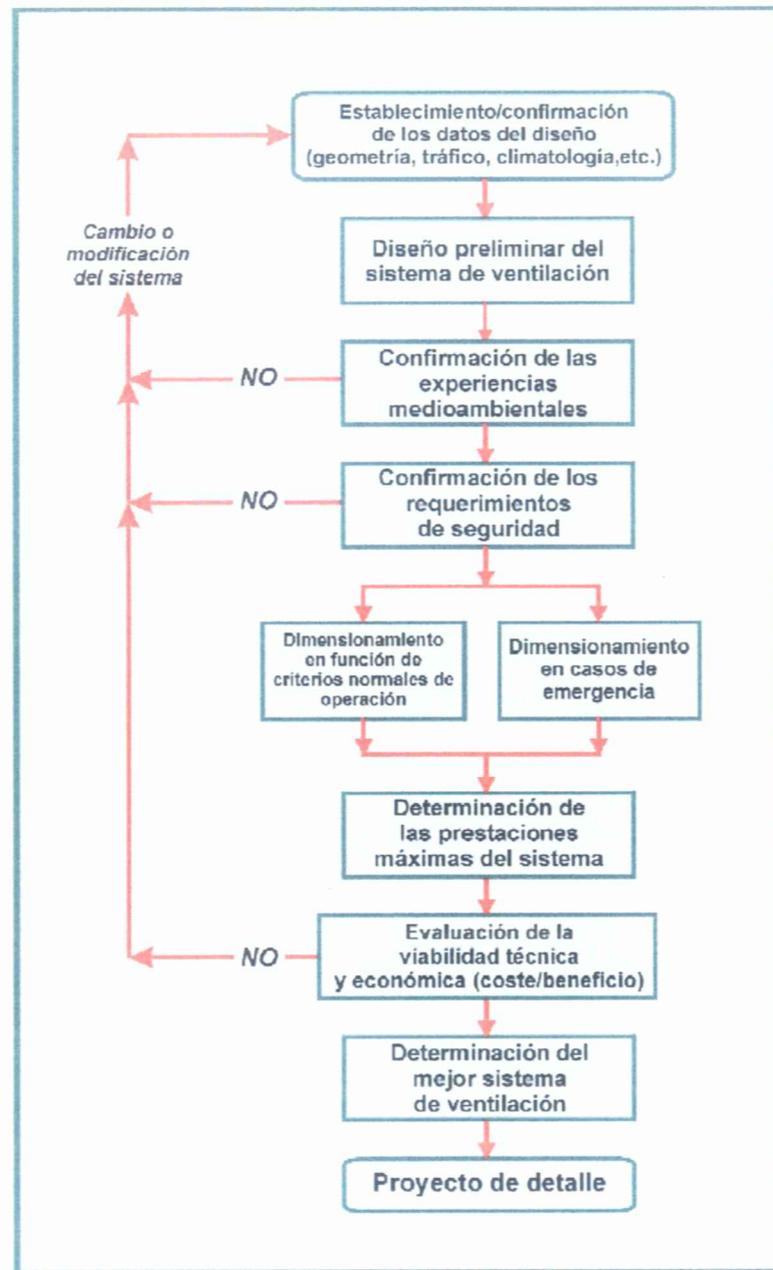


Figura 10.- Proceso de diseño de la ventilación

3.3.1.4.- El incendio en el túnel

El comportamiento y evolución del incendio que se produce dentro de un túnel, es aún insuficientemente conocido.



Es de la mayor importancia conocer el proceso de evolución y hacia dónde se produce el movimiento de humos y gases dentro del túnel, así como conocer la energía calorífica liberada, y las curvas de las temperaturas y presiones alcanzadas.

La profundización en el grado de conocimiento, de la tipología y el comportamiento de los incendios que se producen en los túneles, es fundamental para mejorar su seguridad.

Los caminos para mejorar este conocimiento son:

- La modelización mediante simulación numérica
- Los ensayos a escala reducida
- Los ensayos con incendio real

El procedimiento que más información aporta es el ensayo con fuego real (proyecto EUREKA). Este procedimiento, aunque costoso, debe incrementarse en el futuro principalmente mediante proyectos internacionales de colaboración.

Los ensayos a escala reducida o con humos enfriados, no son válidos, ya que falsean el comportamiento y los resultados.

Sin embargo, la modelización del comportamiento de un incendio, mediante simulación numérica, es un procedimiento recomendable que debe realizarse ya en la etapa de diseño de la ventilación.

Muy importante será también la información que puedan suministrar los incendios que desgraciadamente se produzcan durante la fase de explotación de túneles ya que, la alta instrumentación con la que se diseñan los túneles modernos, permitirá disponer de datos muy valiosos para avanzar continuamente por el camino de reducir los riesgos en los incendios.

La importancia de un incendio, se determina por la relación entre la energía potencial calorífica máxima que puede liberar y la realmente liberada (E_{max}/E). Los ensayos realizados en el proyecto EU499, han permitido establecer la expresión:

$$E_{max} = 5 + 0,006 * E^{2,2}$$

En la Tabla 8, se recogen los resultados de algunos de los ensayos realizados.

TABLA 8.- DATOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS DE FUEGO DEL PROGRAMA EU 499

Ensayo	Vehículo quemado	Energía Potencial Máxima en el fuego GJ	Energía liberada en el fuego MW	Ventilación longitudinal Vm/seg
C21	Coche ligero con abundancia de plástico PKW	7	6	0,5 m/seg
F42	Vehículo con chapa de aluminio U-Bahn-Al	41	21	0,5 m/seg
B-11	Autobús chapa de acero Bus	48	34	0,3 m/seg
FA3	Coach Ic+ICE	57,5	43	4 m/seg
HF1	Camión TIR	87,4	100	6-8m/seg

En la Figura 11 se representan las curvas (E_{max} / tiempo) obtenidas en el proyecto EU 499 para un coche, un autobús y un camión TIR.

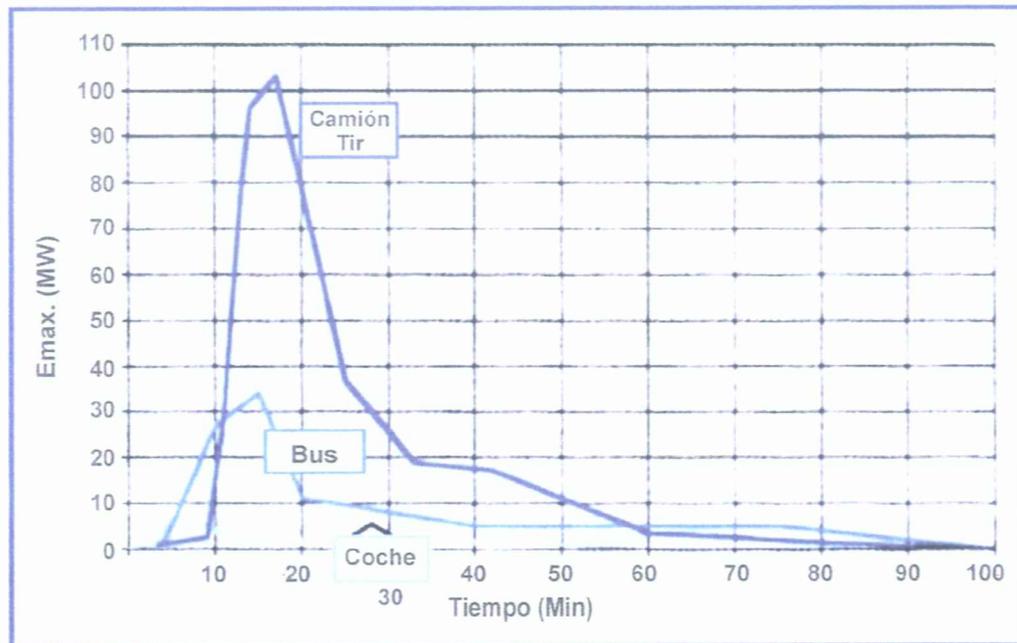


Figura 11.- Curvas(E_{max} /Tiempo) del proyecto EU 499 para distintos vehículos

El comportamiento de un incendio se determina por su curva temperatura-tiempo.

En la Figura 12, se indican las curvas generadas para distintas condiciones y tipos de fuego.

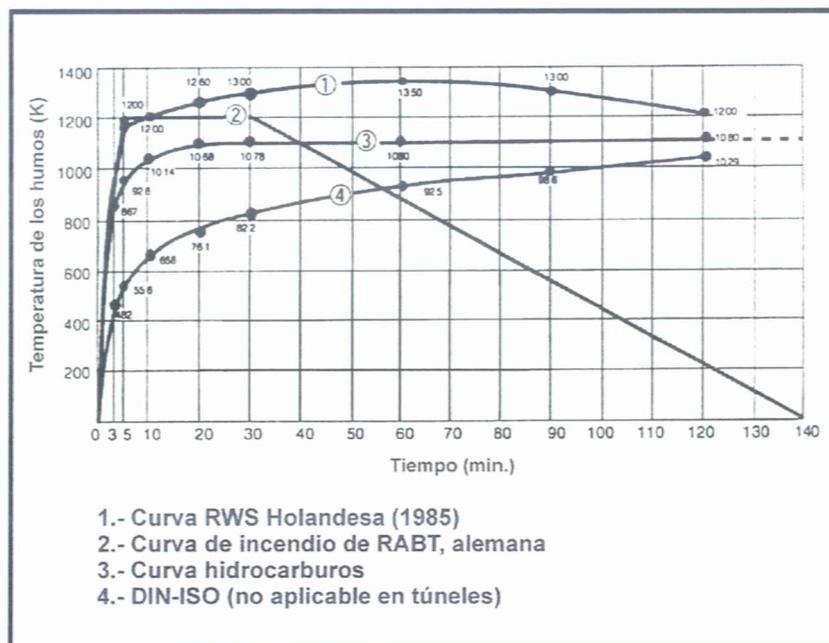


Figura 12.- Curvas generadas para distintas condiciones y tipos de fuego



Básicamente existen dos tipos de incendio: *El incendio celulósico (madera)* regido por la curva (temperatura/tiempo) según las Normas ISO 834, BS 476, apartado 20-24, DIN 4102, apartados I y II. En este tipo de incendio, el inicio es lento, alcanzándose los 821° a los 30 min. y los 925° a los 60 min.

El incendio de hidrocarburos es de iniciación más rápida y alcanza mayor temperatura, llegando a los 1.150° en 30 min. y los 1.200° en 60 min.

El incendio en un túnel difiere de ambos tipos, aunque se asemeja más al incendio de hidrocarburos.

El incendio en un túnel, tiene un desarrollo rápido y puede alcanzar temperaturas más altas que un incendio al aire libre.

La temperatura generada y sobre todo, los gases y humos tóxicos, convierten al incendio en un incidente potencialmente muy peligroso.

El incendio experimenta un desarrollo rápido a partir de los 10-15 min. desde su inicio.

Las temperaturas máximas generadas para distintos vehículos, según resultados del proyecto EUREKA-FIRETUN projet 1995 son:

Coches	400-500 °C
Autobús-camión	700-800 °C
Vehículos muy pesados	1000-1300 °C

Para el cálculo del sistema de ventilación y para el dimensionamiento de las medidas de seguridad, es necesario considerar, como ya se ha dicho, varios escenarios o situaciones de incendio. En cada una de ellas, deben considerarse los siguientes factores:

FACTORES A CONSIDERAR EN UN INCENDIO

- Cantidad de energía liberada y temperatura de iniciación
- Número de vehículos implicados
- Número de afectados por el fuego, humos y gases en caso de atasco
- Situación de la ventilación
- Localización del incendio
- Altitud a la que se produce

Los ensayos realizados en Noruega con incendios reales (proyecto EUREKA) han permitido obtener datos de la:

- Visibilidad
- Distribución de los componentes gaseosos en relación con la potencia calorífica generada por el fuego y la velocidad de la corriente longitudinal
- Energía liberada
- Cantidad de humos liberada

Estos datos son básicos para realizar simulaciones teóricas sobre el comportamiento de incendios en túneles.

El tiempo necesario para liberar la energía depende de:

- La velocidad de la corriente longitudinal
- La resistencia de los materiales a la llama
- Los materiales de la carrocería (acero, aluminio, plástico)

La cantidad de humos χ (m²/gr) liberada en el incendio, así como la cantidad de partículas sólidas Y_s (Kg/Kg) en algunos de los ensayos realizados, se resumen en la Tabla 9.

TABLA 9.- VALORES OBTENIDOS DE LA CANTIDAD POSIBLE DE HUMOS Y DE PARTÍCULAS PARA DISTINTOS ENSAYOS EH 999 FIRETUN

Ensayo	Vehículo quemado	Partículas producidas Y_s [Kg/Kg]	Cantidad de humos producidos χ [m ² /gr.]
C11	Coche con chapa de acero	0,095	0,88
C21	Coche mayoritariamente de plástico	0,08	0,74
B11	Autobuses	0,05	0,46
HF1	Camión TIR	0,02-0,025	0,19-0,23
F42	Vehículo de aluminio	0,08	0,74
FA3	Vehículo IC-ICE	0,03-0,045	0,28-0,42



De esta tabla se deduce que los coches ligeros con carrocería de chapa de acero o plástico, y los vehículos pesados con carrocería chapa de aluminio, son los que producen mayor cantidad de humos y partículas sólidas.

3.3.2. LA ILUMINACIÓN

La iluminación es un elemento muy importante en la seguridad de un túnel. Debe ser la adecuada para cada tramo de túnel y de modo que elimine el efecto de agujero negro, causante de frecuentes accidentes.

En las zonas del túnel donde se necesite un alto nivel de iluminación, principalmente en la zona próxima a las bocas durante el día, se emplean lámparas de alta intensidad de descarga que utilizan el vapor de sodio a alta presión como fuente luminosa. (Fig. 13)

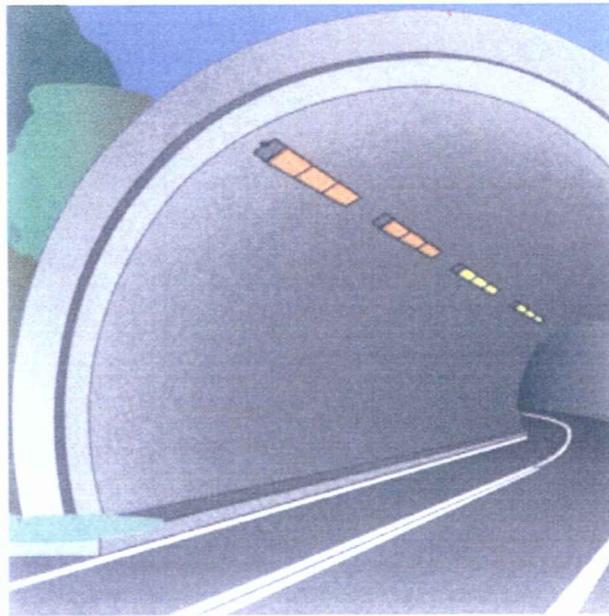


Figura 13.- Instalación de iluminación.

En zonas que exigen menores niveles de iluminación, se usan luminarias con lámparas fluorescentes que pueden ser de encendido electrónico.

El diseño del sistema de iluminación debe hacerse de acuerdo con las recomendaciones para la densidad luminosa propuestas por la AIPCR.

Las lámparas utilizadas en el túnel tienen que combinar su alto rendimiento lumínico, con un consumo energético y costes de mantenimiento bajos. Deben ser, por tanto, de fácil instalación y reposición.

Los sistemas tradicionales de iluminación utilizan una distribución simétrica de la luz. En la zona de los portales, las luminarias colocadas en línea recta, se disponen transversalmente, lanzando el rayo luminoso perpendicularmente al eje del túnel. Recientemente se han introducido las técnicas de iluminación asimétrica. Las técnicas de iluminación utilizadas se resumen en la Tabla 10:

TABLA 10.- TÉCNICAS DE ILUMINACIÓN

Iluminación simétrica	En zona de boquillas
Iluminación asimétrica (proporciona contraste visual)	<ul style="list-style-type: none"> • El rayo luminoso principal se dirige hacia la calzada. Máxima iluminación de calzada y mínima luminancia de los objetos dentro del campo de visión del conductor. • El rayo luminoso principal se dirige en la dirección de la circulación. Mínima iluminación sobre la calzada y máxima iluminancia vertical.
Iluminación electrónicamente controlada	Las lámparas se controlan individualmente con una unidad central, permitiendo hasta 6 niveles de luminosidad en relación con el nivel de iluminación de los portales que se controla mediante célula fotoeléctrica.

En caso de fallo del sistema de alimentación eléctrica, una parte importante del sistema de iluminación debe de seguir funcionando utilizando el sistema de alimentación de energía de reserva que, además, tiene que seguir manteniendo operativos los servicios esenciales entre los que se encuentra el sistema de iluminación.



Para evitar fallos simultáneos de la iluminación a lo largo del túnel, la instalación se realiza en tramos independientes de 200 m. y las luminarias se conectan además de un modo alternativo.

3.3.3. LA SEÑALIZACIÓN

Una adecuada señalización que abarque el propio túnel y una amplia zona de influencia alrededor de él, contribuye muy notablemente a que el tránsito por él sea más seguro. La señalización permite adecuar el tráfico que accede a él, a las exigencias que el tránsito a su través impone. (Ver Figura 14)

Una señalización correctamente diseñada, transmite al conductor la información necesaria en el momento y lugar precisos. Anuncia primero, con suficiente antelación, y señala después la presencia de áreas de servicio y de zonas de aparcamiento en las zonas próximas al túnel; transmite al usuario información relativa al tráfico por el túnel como: velocidad a la que debe circularse, distancia de seguridad que debe observarse entre vehículos, etc.

En situación de congestión o emergencia, el usuario puede recibir información sobre la conveniencia de tomar rutas alternativas que eviten el tránsito por el túnel, e incluso la prohibición de acceder al túnel (semáforo en rojo en la boca de entrada) o de pararse dentro de él (en un punto determinado con semáforo en rojo). En el incendio del túnel del Montblanc parece ser que no se respetaron los semáforos en rojo.

La señalización dentro del túnel (semáforos, limitaciones de velocidad, paneles) tiene que ser muy nítida y bien visible por el conductor.

La señalización horizontal debe marcar con gran nitidez la separación entre calzadas y los límites laterales de la misma.

La señalización cobra una especial importancia al anunciar y señalar puntos del túnel relacionados directamente con el sistema de Emergencia (puntos SOS) como:



- Teléfonos de emergencia
- Bocas de incendios (extintores, bocas de salida de espuma, bocas de salida de agua)
- Pulsador de la señal de alarma
- Refugios
- Salidas de emergencia

Estos puntos, así como el recorrido total de la ruta de evacuación, deben mantener su señalamiento en todo momento, principalmente en caso de evacuación y rescate, debiendo estar conectados a una red alternativa de alimentación de energía eléctrica de emergencia.

La utilización de luces de destello, así como de un señalamiento acústico no estridente de los puntos de SOS puede facilitar su localización, en situaciones de mala visibilidad con presencia de humos, gases y partículas en suspensión.

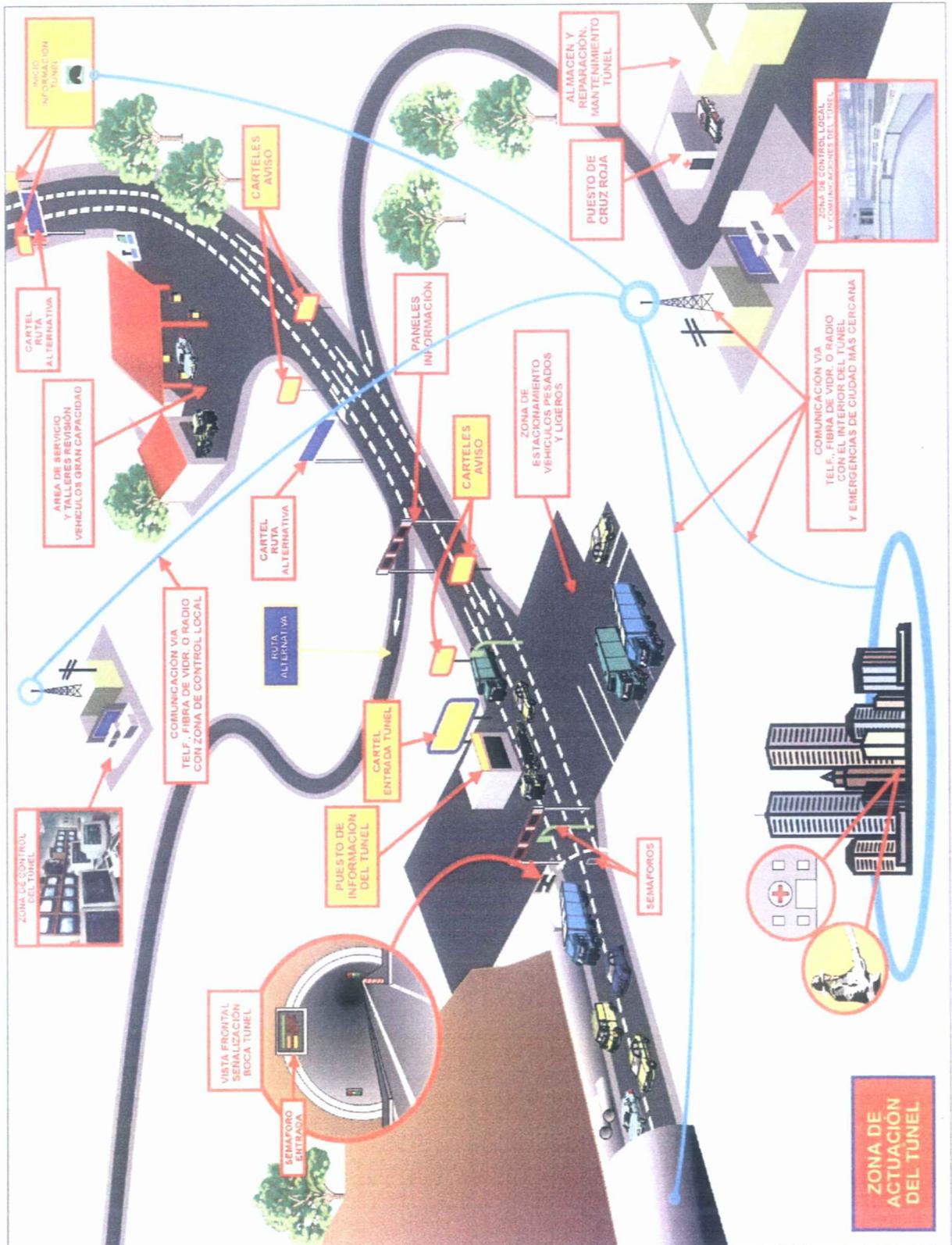


Figura 14.- Zona de influencia y acceso al túnel.



3.3.4.- SISTEMAS DE COMUNICACIÓN

La gestión eficaz de todas las actividades que integran el sistema de seguridad de un túnel necesita disponer de sistemas de comunicación fiables.

3.3.4.1.- Sistema de comunicación entre el personal de operaciones y los usuarios

La adecuada comunicación entre los usuarios del túnel y el personal de operación tiene la máxima incidencia en la seguridad de tránsito por él. Esta información puede ser diferente en cada tramo del túnel y debe darse de manera que no genere situación de pánico.

La comunicación entre los usuarios y el personal de operaciones, en caso de emergencia, es especialmente importante para transmitir instrucciones e información sobre cualquier problemática que se presente. En caso de accidente, sería de gran importancia, en túneles largos, incorporar la posibilidad de comunicación entre el edificio de control y los conductores desde sus vehículos, utilizando sus teléfonos móviles. Cualquier usuario desde su vehículo puede informar al edificio de control de un accidente indicando lugar y circunstancias, incluso antes que se active el sistema de alarma. Esto es especialmente importante en caso de conato de incendio.

3.3.4.2.- Comunicación fuera del túnel

Esta comunicación permite tener informado al conductor antes de acceder al túnel de la situación del tráfico y poder transmitirle instrucciones relativas al tránsito por el túnel.

En situación de atasco en el túnel o emergencia, podrá comunicarse a los conductores la posibilidad de tomar rutas alternativas.



Esta información se transmite mediante paneles de información situados sobre la calzada, conectados al equipo de control de tráfico con una conexión doble.

La comunicación fuera del túnel puede completarse con la información gráfica sobre las características principales del túnel, la explicación en síntesis del sistema de emergencia de que dispone y del modo de usar los distintos elementos que lo componen.

Esta información se podrá distribuir gratuitamente en las estaciones y áreas de servicio próximas.

3.3.4.3.- Comunicación dentro del túnel

En caso de avería, choque, incendio, etc., el usuario dispondrá de un teléfono de emergencia para comunicarse con el personal de operación, dispuesto en las bocas y a distancias determinadas a lo largo del túnel.

Estos teléfonos, van cada uno conectados en zig-zag con líneas individuales para permitir que, si por cualquier causa, un teléfono de emergencia no funcionara, puedan usarse cualquiera de los contiguos.

En túneles largos (a partir de 6 Km.), puede ser conveniente disponer, de un sistema de radio frecuencia diseñado para operar en espacios cerrados que permita transmitir a los usuarios, en caso de emergencia, instrucciones precisas desde el centro de control.

En síntesis, los sistemas de comunicación que pueden utilizarse dentro del túnel, se resumen en la Tabla 11.

TABLA 11.- SISTEMAS DE COMUNICACIÓN DENTRO DE UN TÚNEL

Teléfonos de emergencia	En bocas y a distancias regulares dentro del túnel
Información visual mediante paneles	Con doble conexión con el Centro de Control
Sistema potente de megafonía	Con doble conexión en caso de emergencia
Sistema de señal acústica y luminosa de alarma	En caso de emergencia y evacuación del túnel
Comunicación por radio frecuencia	Entre el centro de control y el usuario (para túneles largos)
Comunicación integrando los teléfonos móviles	Entre el centro de Control y el usuario en ambas direcciones (para túneles largos)

3.3.4.4.- Sistema de comunicación entre el personal de operación y el de los diferentes servicios

La comunicación entre los centros de control local y general y el túnel es crucial y debe estar garantizada.

La información de datos e imágenes que generan los equipos instalados dentro del túnel es en primer lugar recibida por el sistema de supervisión del control que está formado por equipos de comunicación conectados entre sí con conexiones duplicadas de fibra óptica. Desde el equipo de comunicación más próximo a la boca, se transmite la información generada en el túnel al sistema de supervisión del control instalado en la oficina de control local. Este sistema está formado por equipos de comunicación enlazados a su vez mediante conexiones duplicadas.

Finalmente esta información es transmitida al centro de control general mediante una doble conexión de fibra óptica.

Los centros de control local y general, deben estar en comunicación permanente con los servicios de evacuación y rescate tanto locales como regionales (policía, bomberos, Cruz Roja, etc.).



La comunicación dentro del túnel y entre el túnel y las bocas es utilizada por los equipos de mantenimiento, conservación y vigilancia y por los equipos de evacuación y rescate, y se puede establecer por varios sistemas. El sistema por radio permite la comunicación continua dentro del túnel usando bandas de frecuencia MR, VHF, UHF.

Para la comunicación interior se pueden utilizar también aparatos de radio frecuencia, del tamaño de una cajetilla de cigarrillos y alimentada por baterías; estos aparatos disponen de dos bandas de frecuencia VHF (134-174MHz) y UHF (400-512 MHz).

Otro sistema especial para túneles y minas, transmite la señal por inducción a través de un cable de alta resistencia que va enrollado a un carrete, o a través de un hilo de cobre. Puede disponer de hasta 32 canales voz/datos y 16 canales de vídeo operando a la vez. Disponen de amplificadores bidireccionales de señal cada 350 m.

3.3.5.- SISTEMAS DE CONTROL Y VIGILANCIA DEL TRÁFICO

El control y vigilancia del tráfico que accede al túnel y circula por él, es esencial para la seguridad en el túnel.

Mediante los sistemas de control y vigilancia del tráfico, se evita que se produzcan atascos dentro del túnel, o se circule dentro de él con velocidad excesiva o sin guardar las distancias de seguridad entre los vehículos.

Cuando en el túnel se produce una obstrucción en el tráfico, como consecuencia de una emergencia: avería, detención, choque, etc., el sistema permite localizar el lugar donde se ha producido el problema y transmitir las instrucciones precisas a los paneles y señales de tráfico.



Los sistemas de control y vigilancia del tráfico, incorporan las tecnologías más modernas como: CCTV, procesado de imagen, radar, lazos inductivos o magnetómetros.

La información suministrada por detectores estratégicamente colocados, es recibida y procesada mediante algoritmos desarrollados específicamente para esta función. La transmisión digital de datos, permite coordinar éstos con los datos de vídeo y audio que son recibidos por el sistema de control del tráfico.

3.3.6.- CONTROL DE LA ATMÓSFERA DEL TÚNEL

Como consecuencia del tránsito de vehículos dentro del túnel, se produce una emisión de humos, gases y partículas sólidas, sustancias contaminantes producidas durante el proceso de combustión de los motores; estas sustancias son peligrosas para la salud por su toxicidad: CO, NO_x, SO_x, ...

Otras sustancias, aún no muy bien conocidas, producidas como consecuencia del uso de catalizadores son, sin embargo, cancerígenas. Finalmente las partículas sólidas en suspensión, principalmente las de tamaño inferior a 15 micras., pueden ser aspiradas y producir alergias, asma y bronquitis. Estas partículas en suspensión pueden eliminarse de la corriente de ventilación mediante precipitadores electrostáticos situados en la boca de salida.

Estas sustancias contaminantes producen también turbidez en el aire con una disminución de la visibilidad, lo que influye muy notablemente en la seguridad del tráfico dentro del túnel.

La primera función de la ventilación en el túnel es asegurar que la concentración de las sustancias nocivas que se encuentran presentes en la atmósfera del túnel, no sobrepasen los límites fijados por las especificaciones marcadas por los organismos competentes en seguridad y salud humana.



Otra función importante es la de diluir los humos y partículas, de modo que los límites de visibilidad no sobrepasen unos valores prefijados. La visibilidad debe ser igual o mayor de 10 m. equivalente a una densidad óptica de $0,1 \text{ dBm}^{-1}$ según las normas CIBSE guía E.

Para conseguir estos objetivos, se disponen a lo largo del túnel, de detectores y medidores de la concentración de gases: CO, NO_x y de partículas sólidas en suspensión, así como opacímetros para medir la turbidez de la atmósfera.

En determinados lugares del túnel, deben instalarse analizadores multigases que, en caso de una anómala concentración de CO producida por un incendio, emite una señal que activa automáticamente el sistema de ventilación para caso de incendio.

Además, es necesario conocer también otros parámetros de la atmósfera del túnel, como: caudal, velocidad, presión y temperatura de la corriente de aire, para lo cual se dispondrá a lo largo del túnel de la instrumentación necesaria para medir estos parámetros.

3.3.7.- SISTEMA DE DETECCIÓN Y ALARMA

Una de las conclusiones del informe final del grupo 4 de trabajo de la ITA de 1998, es la *máxima prioridad que debe darse a los sistemas de detección en los túneles*.

La detección de cualquier incidente, debe ser rápida, durante los primeros instantes, pocos segundos. Los sistemas de detección tienen que ser de respuesta inmediata y fiable.

En caso de incendio, la celeridad en su detección es especialmente importante para poner en marcha inmediata los sistemas de emergencia y seguridad. La extracción inmediata y muy próxima al foco del humo y gases generados es de la mayor



importancia, para evitar su difusión por el túnel. Cualquier incidente que se produzca, debe ser detectado inmediatamente.

Los sensores instalados para controlar el tráfico en condiciones normales, son también muy adecuados para detectar condiciones de tráfico inusuales (opacímetros, analizadores multigases, cámaras de vídeo., etc.)

Adicionalmente, pueden instalarse, por duplicado, otros detectores de incendios como: detectores discriminadores de CO y sistemas de medición lineal de la temperatura a lo largo del túnel.

Los detectores discriminadores de CO permiten distinguir cuando una concentración de CO es producida por un incendio o por los gases de los tubos de escape de los vehículos. Disponen de dos células electroquímicas que detectan la presencia del CO y del NO, deduciendo de la concentración medida, la correspondiente al escape de los motores de combustión.

Estos detectores van conectados a un sistema de alarma y pueden ir conectados también a un sistema automático de extinción del fuego.

Los sistemas de medición lineal de temperatura, utilizan un cable sensor detector de temperatura que va colocado en el techo del túnel, y que compara la temperatura en cada punto del túnel, con la temperatura tipo en su interior.

Otro método utiliza un cable de fibra óptica a lo largo del túnel, con una longitud máxima de 4 Km. por cada unidad de medición. La vibración producida por la temperatura a lo largo del cable, es medida por un rayo láser.

Los cambios de temperatura son detectados por el láser; estos datos, relacionados con su localización en el túnel, son recibidos en la sala de control; un programa informático específico, permite visualizar el lugar, el tamaño, la evolución y el sentido de movimiento del incendio, humos y gases calientes.



Este tipo de sistemas permitirá en un futuro utilizar esta información para seleccionar y activar el sistema más adecuado de control del incendio, integrándolo dentro del sistema general de emergencia.

Finalmente, otro sistema de detección y alarma es el instalado en los puntos de emergencia (postes SOS) situados a intervalos regulares coincidiendo con los puntos de localización de los extintores en los que se incluye un botón pulsador que acciona el sistema de alarma y que puede incluir también un teléfono de emergencia.

Los receptáculos donde van instalados los extintores de incendios y bocas de incendio, llevan sus puertas de cierre conectadas, mediante contactos magnéticos instalados en ellas, a un sistema de alarma magnética que está conectada con el sistema de supervisión del control y toma de datos instalado dentro del túnel.

Existen recomendaciones para fijar las distancias de los distintos sensores y puntos de emergencia.

En los túneles que atraviesan la bahía de Tokio, los sistemas de detección y alarma están colocados a las siguientes distancias:

- Detectores de incendio, cada 25 m.
- Puntos de emergencia (botón pulsador, boca de incendios y extintores), cada 50 m.
- Teléfonos de emergencia, cada 150 m.
- Cámaras de TV, cada 150 m.

En síntesis, los sistemas de detección y alarma, se resumen en la Tabla 12.

TABLA 12.- SISTEMAS DE DETECCIÓN Y ALARMA

Detectores discriminadores de CO	Se colocan por duplicado
Sistema de detección lineal de temperatura	Cable sensor
	Cable de fibra óptica
Puntos de emergencia (postes SOS)	
Alarma magnética en los receptáculos de los extintores y bocas de incendio	Conectada con el sistema de supervisión del control
Sensores para el control de tráfico	Opacímetros, analizadores multigases, sensores de temperatura, cámaras de vídeo



3.3.8.- SISTEMA DE EMERGENCIA

3.3.8.1.- Equipamiento contra incendios

Como ya se ha dicho, el incendio es el incidente que más aumenta el nivel de riesgo en un túnel. La primera acción es impedir que el incendio se produzca; una vez que desafortunadamente, se haya producido, como ya hemos dicho, la siguiente acción es su inmediata localización y detección que pondrá automáticamente en funcionamiento el sistema de emergencia.

Este sistema de emergencia, como lucha directa contra el fuego, tiene como primera acción, intentar apagarlo por los propios usuarios afectados o por el personal de explotación, acudiendo al punto del sistema de emergencia más próximo y utilizando extintores y bocas de incendio, como un primer nivel de equipamiento. Cuando el túnel tiene ventilación transversal, además de forzar la aspiración de humos y gases exclusivamente por las trampillas más próximas (1-6), deberá suprimirse también la entrada de aire fresco por la parte inferior de la sección en la zona del incendio. En algunos países se utiliza el sistema de ducha artificial conectada automáticamente con detectores de CO o de temperatura. La eficacia y conveniencia de utilizar la lluvia artificial es objeto de actual controversia. En cualquier caso, será necesario disponer de un estanque con suficiente reserva de agua. El uso del agua para sofocar incendios, no es recomendable, sobre todo en incendios de gasolina (AIPCR 1995). Sin embargo, el uso del agua para rebajar la temperatura es adecuado siempre que lo utilice la brigada especializada contra incendios, y una vez que se compruebe que el personal ha sido evacuado.

Algunos países utilizan el método de inundación que consiste en la inundación de la zona del incendio como elemento de extinción.

Estos sistemas de uso masivo del agua como elemento de extinción, tendrán que ser desarrollados y perfeccionados en un futuro próximo.

El incendio deberá ser apagado en los primeros minutos; la mayoría de los incendios incrementan su virulencia a partir de los 10 min. de su iniciación.

Una vez que ha transcurrido este tiempo, si el incendio no ha sido sofocado, deberá abandonarse el túnel acudiendo rápidamente a las salidas de emergencia más próximas.

La lucha contra el incendio, en una segunda fase, será realizada por personal experimentado que disponga de los medios adecuados de lucha contra el fuego y vaya provisto también de equipos autónomos de respiración, de supervivencia y de rescate. (Fig. 15).



Figura 15.- Lucha contra el incendio (2ª fase).

Esta brigada de bomberos puede ser propia adscrita al túnel o pertenecer al servicio de bomberos de la localidad más próxima.

En cualquier caso, el servicio contra incendios del túnel, en caso necesario, solicitará ayuda de los parques de bomberos de las poblaciones más próximas.



Los túneles largos o con tráfico muy denso, deben disponer de un sistema de control de los humos y gases generados por un incendio, para evitar que éstos se expandan a lo largo del túnel dificultando la lucha contra el incendio y las tareas de evacuación y rescate.

Hasta aquí hemos hablado de la lucha activa contra un incendio declarado. Ahora vamos a hablar de la lucha pasiva.

Esta lucha pasiva comprende todas las acciones tendentes a dificultar o retardar la aparición del incendio o a aminorar la producción de humos densos o de gases tóxicos.

La lucha pasiva puede contribuir de un modo muy notable a la disminución del nivel de riesgo que causa el incendio en un túnel. Esta lucha pasiva se establece analizando los mecanismos susceptibles de provocar fuego por calentamiento incontrolado y el punto de inflamación de los materiales que rodean estos mecanismos.

Los mecanismos que pueden desencadenar un incendio son:

- El propio vehículo
- Los propios equipos instalados dentro del túnel (ventiladores, bombas, transformadores, subestaciones, sistema de alimentación de la energía eléctrica, cuadros eléctricos, tuberías, etc.).

Nos referiremos en primer lugar a los propios vehículos que circulan por el túnel, como posible fuente generadora de incendios.

La situación individual potencialmente más peligrosa es el tránsito por el túnel de vehículos industriales que transportan sustancias inflamables o explosivas; le sigue el tránsito de sustancias peligrosas.

Una buena medida preventiva es prohibir el tránsito por el túnel de sustancias inflamables o explosivas.



En cuanto a las sustancias peligrosas, una buena medida es restringir el tránsito por el túnel a horas de poco tráfico y en régimen de convoy.

En algunos países, como Japón, puede prohibirse por ley el tránsito de estas sustancias en túneles con una longitud mayor de 5 Km. y en túneles bajo el agua.

Otro elemento individual, potencialmente peligroso, es el vehículo industrial muy cargado y que se introduce dentro del túnel con el motor sobrecalentado, los circuitos hidráulicos, eléctricos, de refrigeración y el sistema de frenos muy sobrecargados, después de muchos kilómetros de marcha superando tramos largos de fuertes pendientes.

Una buena medida preventiva sería, que estos vehículos, antes de entrar en un túnel largo, permanecieran aparcados en extensas áreas de servicio en las proximidades del túnel, hasta que el vehículo recuperara sus condiciones normales de funcionamiento. Además, este tiempo podría emplearse en revisar y hacer pequeñas reparaciones, si fuera necesario. Los túneles bajo la bahía de Tokio disponen de aparcamientos para 80 camiones y 350 vehículos.

La peligrosidad de los vehículos industriales se reduce cuando se utilizan aceites especiales resistentes al fuego para los circuitos hidráulicos. Estos aceites hidráulicos son auto-extintores y tienen un mayor nivel de autoignición, y producen pequeñas emisiones de humos de baja toxicidad.

Algunos aceites hidráulicos producen humos muy tóxicos como los: etilenoglicoles, propilenoglicoles y esteres-fosfatados. Otros, como el glicolhidratado y la emulsión invertida, se inflaman cuando pierden el agua.

Los aceites no minerales como el Polyol-éster, en cambio, son resistentes al fuego y biodegradables.



Las características de los materiales utilizados en la construcción de los vehículos tienen su influencia en caso de incendio. En general, la chapa de acero se comporta mejor ante un incendio que las chapas de aluminio y los materiales de plástico. Algunas pinturas son especialmente nocivas en caso de incendio.

El aluminio y los plásticos producen una mayor cantidad de humo.

Los materiales de PVC, son especialmente nocivos en caso de incendio ya que, además de producir una gran cantidad de gases, estos son muy densos y viscosos e impiden la visibilidad siendo, además, muy tóxicos. Estos gases contribuyen sobre manera a generar pánico en caso de incendio.

No deben utilizarse plásticos que contengan elementos halógenos como: cloruros, fluoruros o bromuros.

Los gases generados son altamente corrosivos y atacan las superficies de otros materiales, incluido los hormigones.

El gas cloruro generado (ClH), tiene una muy alta toxicidad, limitándose la concentración admisible a 8 p.p.m. Una concentración de 800 p.p.m. produce la muerte; En un incendio, la concentración de este gas, puede llegar a valores de hasta 2.400 p.p.m.

Lo anteriormente dicho sobre el uso de los plásticos de PVC, es válido para cualquier aparato instalado dentro del túnel que contenga este material.

En relación con los cables eléctricos, estos deben estar recubiertos con revestimientos especiales que no contengan materiales halógenos, y deben estar fabricados con materiales que, a 170° C, se descomponen mediante una reacción endotérmica generando pocos humos. A este tipo pertenece el cable fabricado con un nuevo material llamado, según los distintos fabricantes, LSF, LSOH, LSZH, LSHF, que contienen aluminio trihidratado como material de relleno.

Los cables de los circuitos eléctricos de los vehículos y de las instalaciones eléctricas del túnel, irán revestidos con este tipo de materiales, para evitar que, además de arder, propaguen el fuego a lo largo de ellos, principalmente los cables dispuestos verticalmente.

Los cables que se utilizan dentro del túnel deben tener las siguientes cualidades:

- No contribuir al fuego
- No propagar la llama
- No generar humos densos
- No emitir gases tóxicos

En relación con su resistencia al fuego, hay tres categorías de cables que se resumen en la Tabla 13.

TABLA 13.- CATEGORÍAS DE CABLES POR SU RESISTENCIA AL FUEGO

<p>GRUPO PRIMERO Retardadores de llama (flame retarder)</p>	<p>Es el grupo más numeroso, constituido por circuitos no esenciales, que interrumpen su servicio durante el incendio; utilizan materiales retardadores de llama</p>
<p>GRUPO SEGUNDO Resistentes al fuego (fire resistant)</p>	<p>A él pertenecen circuitos esenciales de alimentación de bombas, ventiladores... Estos cables están contruidos con materiales resistentes al fuego, y soportan durante un tiempo limitado la acción del fuego</p>
<p>GRUPO TERCERO Soportan el fuego (fire survival)</p>	<p>Pertenece a circuitos de supervivencia y diseñados para sobrevivir al fuego. Estos cables superan el test más severo de fuego vertical, IEC.332 parte 3, categoría A. Estos cables sobreviven a un incendio con una temperatura de 950° durante tres horas</p>



Algunas máquinas como: ventiladores, bombas, transformadores, cuadros eléctricos, etc., deben diseñarse para trabajar adecuadamente en condiciones de altas temperaturas sin que la máquina deje de funcionar o se incendie.

En relación con los vehículos, sería muy conveniente, principalmente los industriales, que llevaran sus propios sistemas de extinción adecuados a las características del vehículo y a la carga que transportan. Esta medida podría extenderse también a los vehículos ligeros.

Finalmente, los falsos techos, conductos de cables, hastiales, conductos de aspiración de humos y gases calientes, paneles, etc., deben ser protegidos con materiales especiales resistentes al fuego, como las resinas fenólicas.

Los paneles resistentes al fuego, se fabrican de acero y van recubiertos de una capa cerámica de 100 micras; se pueden construir con diversos tiempos de resistencia al fuego. Los interruptores eléctricos, la planta de ventilación, los conductos de ventilación y de cables, así como el centro de control de sistemas contra incendios, se construyen con hormigones ligeros resistentes al fuego, fabricados con áridos granulados de vidrio y espuma reforzados con fibra de vidrio. Al no absorber agua los agregados, no afectan a los hormigones ni la sal, ni el hielo. Los hormigones ligeros resistentes al fuego, con una densidad de 500 Kg/m^3 , se utilizan en aplicaciones no estructurales; este hormigón, se compone de cemento, microsílíce, esferas de polietileno expandido y de arcilla expandida. Resisten hasta los 1.350° C . Los hormigones estructurales tienen una densidad de 1.600 Kg/m^3 y su resistencia puede llegar hasta 35 Mpa.

En túneles sumergidos, se protegen los revestimientos con materiales que resisten temperaturas de hasta 1.350° C durante 2 horas (Normativa Holandesa).



3.3.8.2.- Rutas de Evacuación

El mantenimiento de un nivel de seguridad adecuado en los túneles, exige que estos dispongan de rutas de evacuación seguras y rápidas.

En caso de un accidente importante: fuego, derrame de líquidos o gases tóxicos, el tiempo de exposición a las atmósferas que se producen, sin poner en peligro grave la salud, depende de la concentración de los gases presentes y del tipo de gases generados, y es de muy pocos minutos. En este corto espacio de tiempo, el usuario del túnel tiene que haber abandonado la zona del incidente y estar dentro de la ruta de evacuación hacia el exterior.

Las rutas de evacuación a lo largo del túnel tienen que estar muy bien señalizadas, tanto las salidas de emergencia, como su recorrido.

Las puertas de emergencia deben estar señalizadas muy nítidamente, con una señalización de emergencia resistente al fuego. Esta señalización tiene que ser visible aún en situación de muy mala visibilidad utilizando, para ello, la iluminación de destello (flash) y señales acústicas no estridentes. (Fig. 16).



Figura 16.- Puertas de emergencia.

En la zona de las puertas de emergencia, deben instalarse también altavoces potentes, teléfono de emergencia y sistemas de extinción de incendios.

La anchura de estas puertas, tiene que permitir el paso simultáneo de dos personas (se recomienda una anchura de 1,70 m.)

Suponiendo una velocidad específica de evacuación de 1,5 personas/seg. m., la capacidad de evacuación de una puerta de 1,70 m. sería de 153 personas/minuto.

El espacio comprendido entre la puerta de emergencia y la ruta de evacuación es un espacio de seguridad para el usuario, y tiene que estar perfectamente señalizado, iluminado, transitable y ventilado; la presión en el circuito de ventilación de la ruta de evacuación, tiene que mantenerse siempre superior a la presión existente en la atmósfera del túnel para evitar la entrada de humos y gases.



En túneles largos, se instalan también refugios con circuito cerrado de oxígeno, con capacidad para mantener a varias personas dentro de una atmósfera respirable durante 2,5 horas. En el accidente del Montblanc, se ha puesto de manifiesto la ineficacia de este tipo de refugios por lo que será necesario, en un futuro, diseñar refugios más seguros y con mayores tiempos de permanencia. Con frecuencia se utilizan también las galerías de conexión entre túneles como refugios.

Las rutas de evacuación deberán permitir un fácil acceso al túnel a las brigadas de rescate y de lucha contra el fuego a través de las puertas de emergencia.

La separación entre las puertas de emergencia es variable entre 100 y 700 m. en función, principalmente, de la longitud del túnel y de la densidad de tráfico (ITA 1998).

En los túneles de carretera bajo la bahía de Tokio, de 9,5 Km. de longitud y 2.470 vehículos/hora x tubo, la separación de las puertas de emergencia es de 300 m. debido a la menor capacidad de evacuación (50 personas/min.) de las escaleras deslizantes diseñadas para acceder a la galería inferior de evacuación.

En los túneles gemelos de 6,6 Km. de Westerschelde en Holanda, bajo el río Westerchelde de próxima construcción, las puertas de emergencia han sido diseñadas cada 250 m. y conectadas a pasos transversales para peatones que unen ambos túneles.

La velocidad de evacuación puede estimarse en 1,2 m./seg., para una persona no accidentada y de 0,5 m./seg., para una persona accidentada; en caso de incendio, puede estimarse una reducción del 25% de estas velocidades.

El diseño de las rutas de rescate se realiza utilizando modelos de evacuación de simulación numérica utilizando programas específicos que cuantifiquen el riesgo, para cada escenario de evacuación considerado; este modelo estimará el tiempo empleado en el escape y el tiempo máximo que se puede estar dentro del túnel sin peligro grave.

Estas simulaciones de los distintos supuestos de evacuación, deben estar integrados dentro de un modelo de simulación de humos.

Los diseños de las rutas de evacuación dependen principalmente de la longitud de los túneles, de la densidad de tráfico y del sistema de ventilación.

Los diferentes sistemas de evacuación son:

DIFERENTES SISTEMAS DE EVACUACIÓN

a) Túnel corto (menor de 350 m.)

La ruta de evacuación es el propio túnel con salida hacia las bocas

b) Túnel con ventilación longitudinal y semitransversal

b.1.) Rutas de evacuación mediante galerías de acceso al exterior (Fig. 17.1)

b.2.) Rutas de evacuación mediante pozos de evacuación al exterior. (Fig. 17.2)

b.3.) Rutas de evacuación mediante conexiones laterales a una galería de evacuación, con puertas de emergencia. (Fig. 17.3)

b.4.) Rutas de evacuación mediante conexiones laterales a otro túnel gemelo a intervalos regulares con puertas de emergencia. (Túneles de Westerschelde) (Fig. 17.4.a y Fig. 17.4.b)

b.5.) Ruta de evacuación mediante galería de evacuación situada debajo de la calzada del túnel y conectada con ésta mediante escaleras en cada salida de emergencia. (Túneles bajo la bahía de Tokio). (Fig. 17.5)

c) Túneles con ventilación transversal con aporte de aire fresco. La ruta de evacuación es el propio túnel; además puede haber otras rutas.(Fig. 18)

En los túneles con ventilación transversal, la ruta de evacuación es el propio túnel; para que la evacuación se produzca en las condiciones adecuadas de seguridad, será necesario mantener el tapón de gases y humos confinado dentro del entorno del incendio, permitiendo la correcta evacuación a través de los tramos extremos en dirección a las bocas. En estas condiciones, no son necesarias las salidas de emergencia.

En las figuras 17.1. a 17.5., y 18, se resumen de una manera gráfica, diferentes sistemas de evacuación.

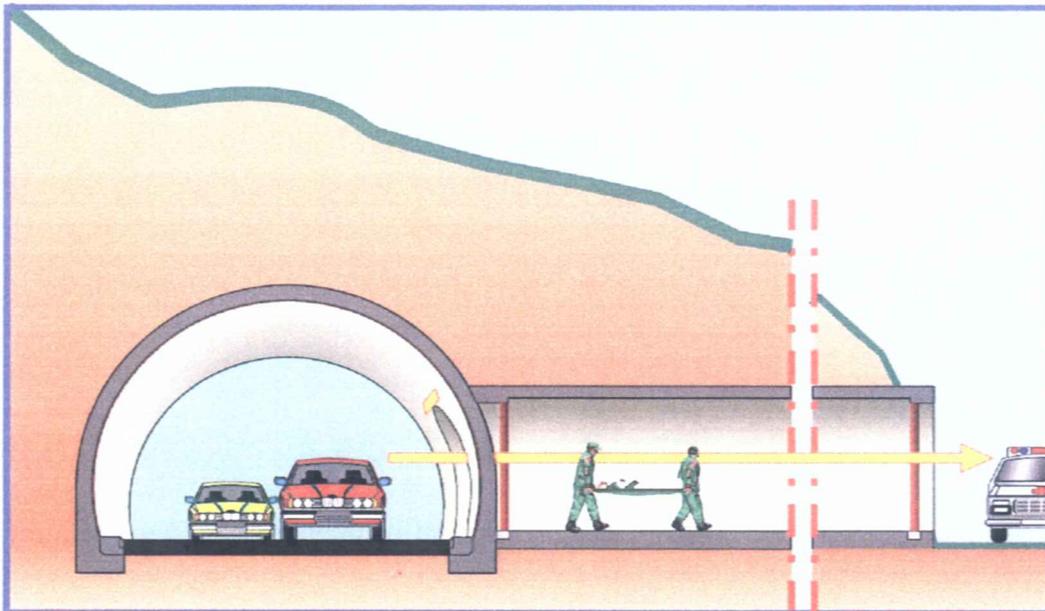


Figura 17.1.- Ruta de evacuación mediante galerías de acceso al exterior.

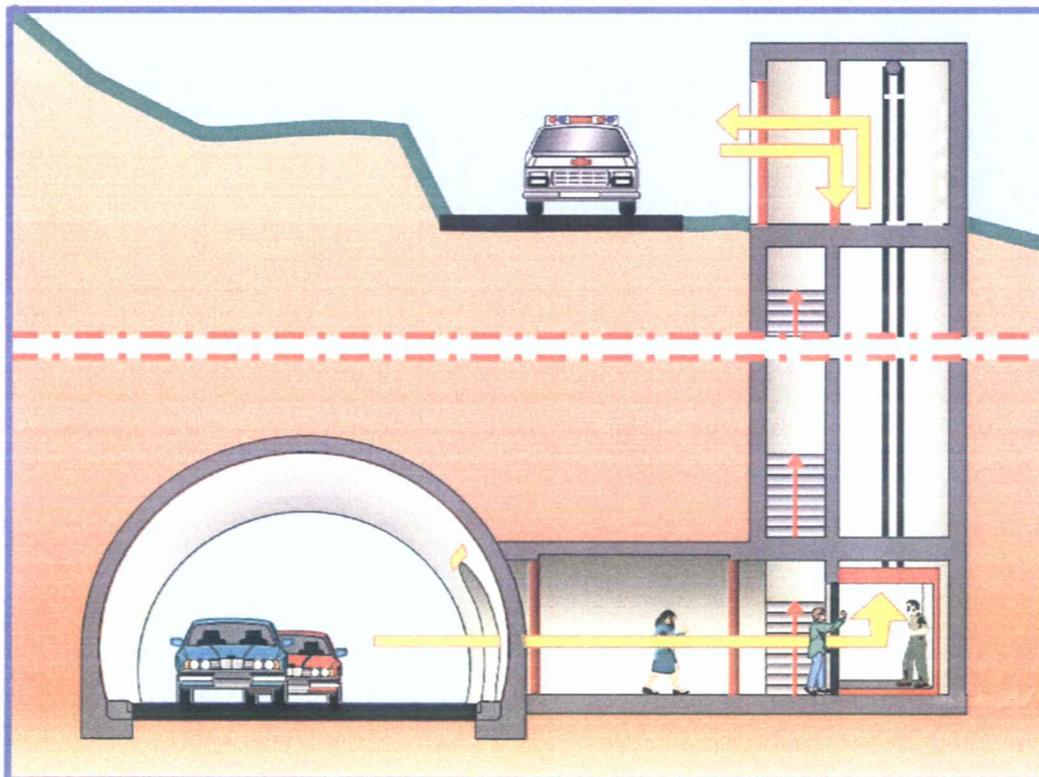


Figura 17.2.- Ruta de evacuación mediante pozo de evacuación al exterior.

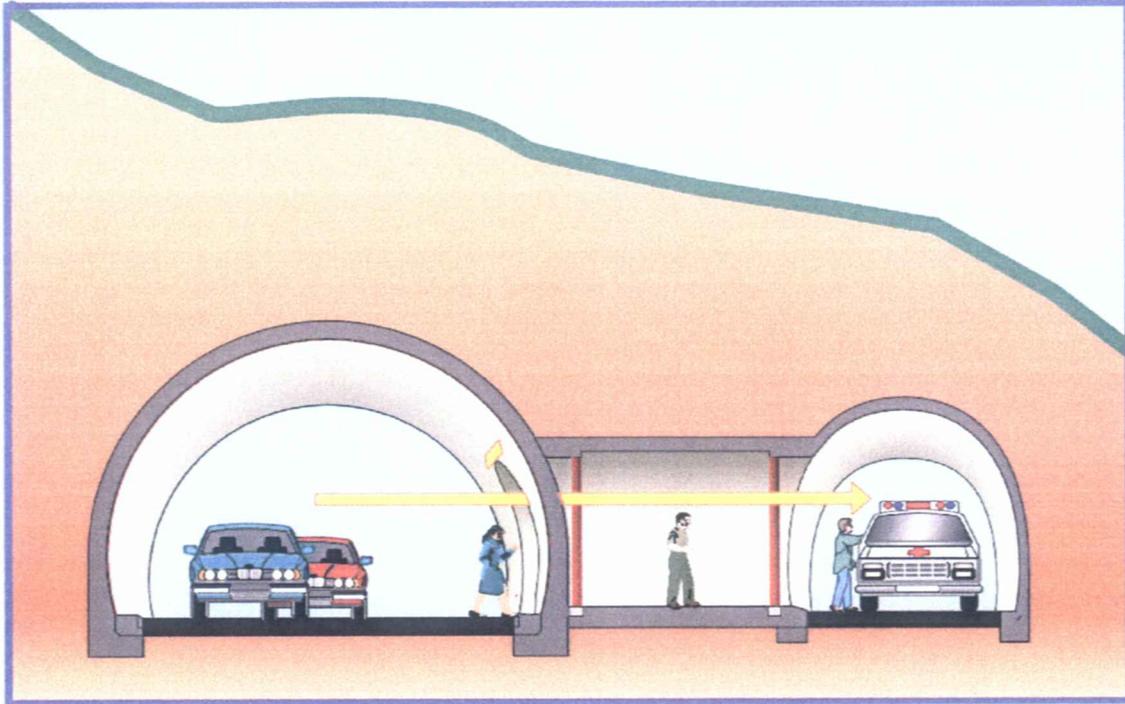
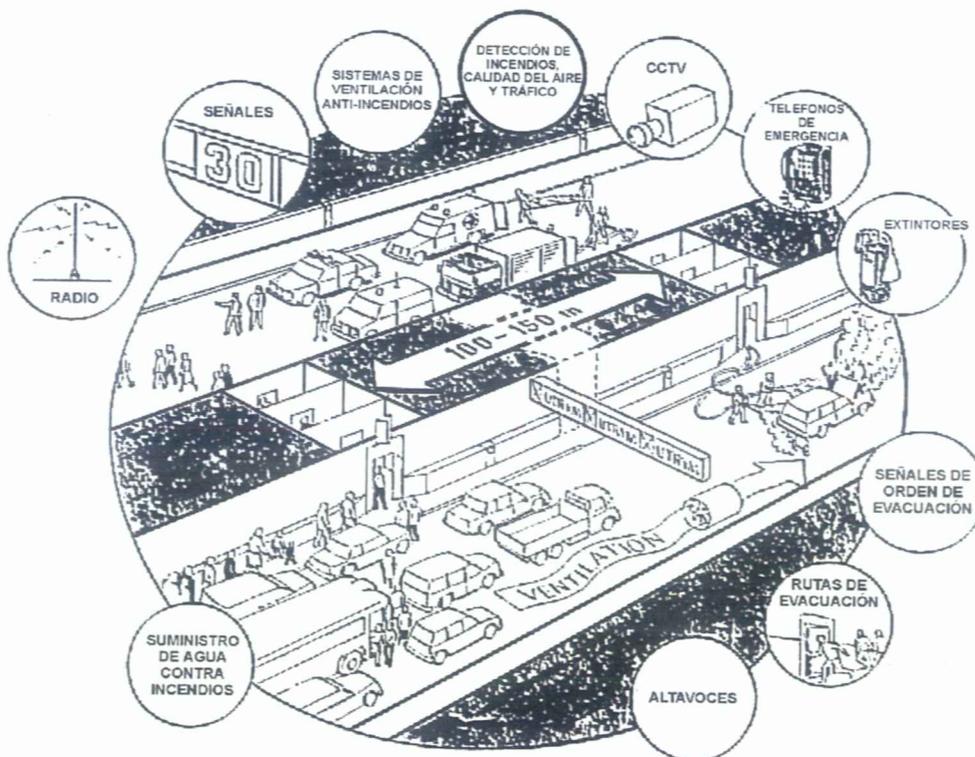
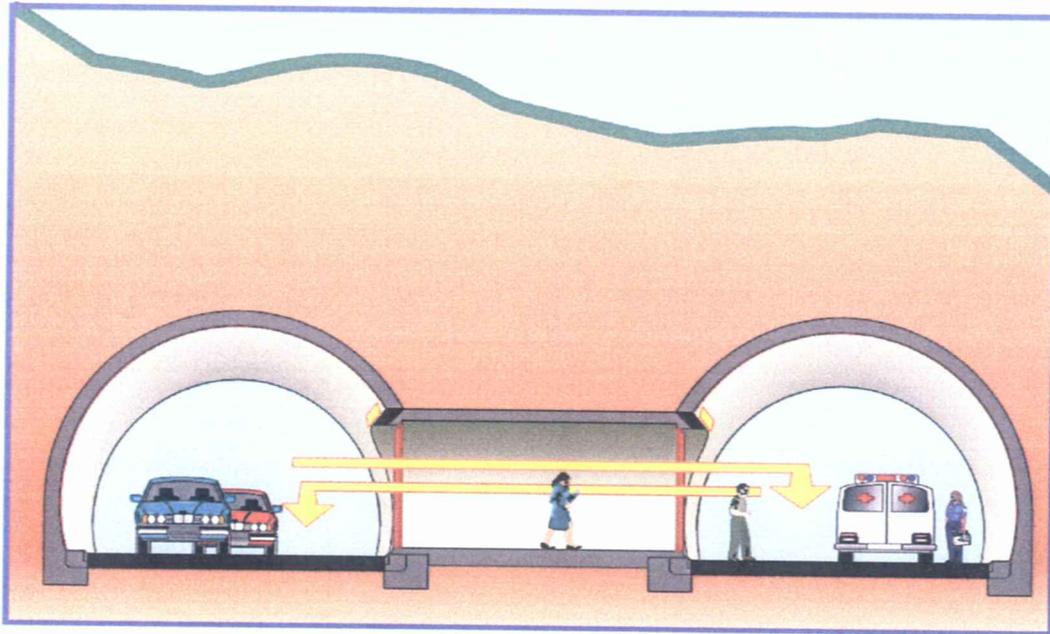


Figura 17.3.- Ruta de evacuación mediante conexiones laterales a una galería de evacuación, con puertas de emergencia.



Figuras 17.4 a y 17.4 b.- Ruta de evacuación mediante conexiones laterales a otro túnel gemelo a intervalos regulares con puertas de emergencia..

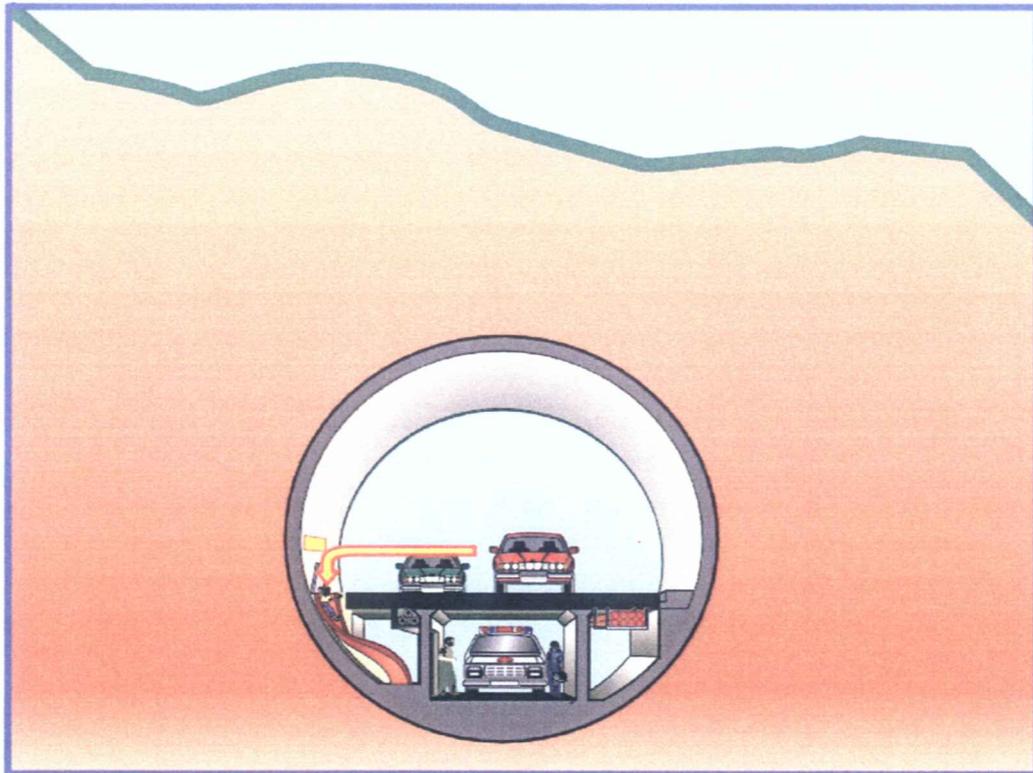


Figura 17.5.- Galería de evacuación situada debajo de la calzada del túnel y conectada con ésta mediante escaleras en cada salida de emergencia. (Túneles bajo la bahía de Tokio).

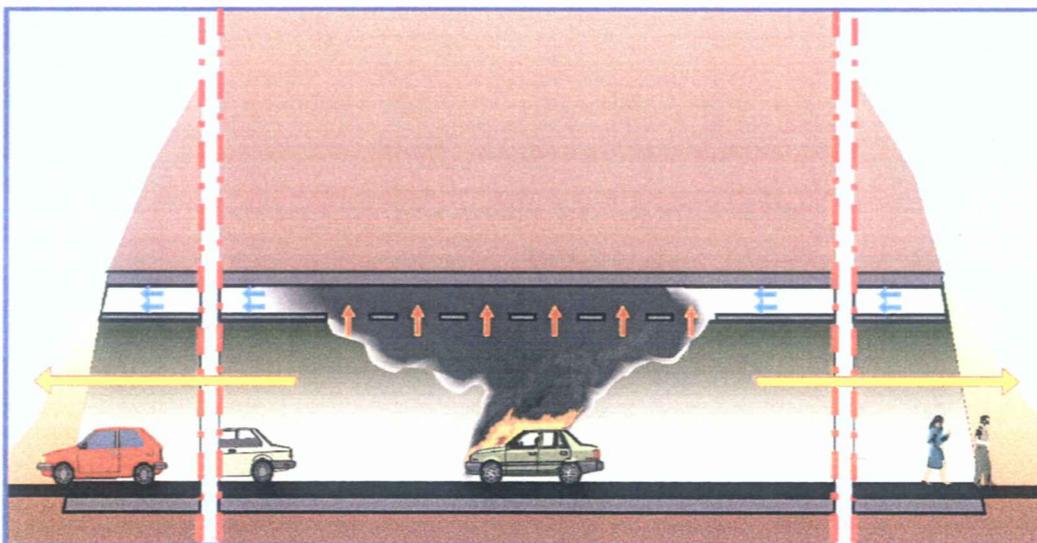


Figura 18.- Túneles con ventilación transversal con aporte de aire fresco. La ruta de evacuación es el propio túnel; además puede haber otras rutas.



3.3.8.3.- Equipo de rescate

El rescate es la última fase del sistema de emergencia. Una vez dada la alarma y puesto en marcha el sistema de emergencia, a la vez que se inicia la evacuación o autorescate, entran en acción inmediata los equipos internos de rescate, propios del túnel.

El equipo de rescate debe estar dimensionado de acuerdo con la importancia del túnel.

El equipo de rescate se compone, básicamente, de dos unidades de acción, la unidad de extinción de incendios (bomberos) y la unidad de salvamento.

La unidad de extinción de incendios, dispondrá de la dotación y medios necesarios para sofocar con rapidez un incendio importante dentro del túnel; dispondrá también de equipos de respiración autónoma, equipos de comunicación, equipos de seguridad (detector de gases, arneses de seguridad, cuerdas salvavidas, montacargas y trípode), equipos autónomos de iluminación y otros equipamientos específicos propios de las actividades del cuerpo de bomberos.

La unidad de rescate contará, igualmente con la dotación de personal sanitario y medios necesarios para facilitar y completar la evacuación de los heridos, prestándoles al mismo tiempo, los primeros auxilios. Dispondrá del número de ambulancias y el equipamiento necesario para atender personas que puedan presentar síntomas de asfixia, intoxicación por inhalación de gases y quemaduras.

Es importante que el equipo de rescate posea la adecuada capacidad de respuesta y un acceso fácil y rápido al lugar del accidente.

Los bomberos utilizarán en la extinción del incendio las bocas de incendio, instaladas en el túnel, además de sus sistemas autónomos de extinción.



Si la importancia del accidente lo requiere, se pedirá ayuda a los equipos externos de rescate (policía, bomberos, ambulancias, hospitales).

Los equipos de rescate tienen como principal misión, además de apagar el fuego, completar la evacuación de las personas, en especial las accidentadas, y rescatar las personas de los refugios y las que hayan podido quedar atrapadas en el lugar del accidente, llevando a los hospitales a las personas accidentadas.

Para diseñar adecuadamente los equipos de rescate, los túneles se clasifican en:

CLASIFICACIÓN DE LOS TÚNELES EN
RELACIÓN CON LOS EQUIPOS DE RESCATE

Túneles cortos: entre 500-1000 m.

Túneles largos: entre 1000-15.000 m.

Túneles muy largos: > 15.000 m.

Los equipos de rescate acceden al lugar del accidente por las mismas rutas de evacuación adecuadamente diseñadas para estos fines.

Cuando el acceso al túnel se realiza además por otros puntos distintos de la boca como: galerías de acceso, galería auxiliar de evacuación y pozos, los vehículos y medios utilizados, deberán ser los apropiados para circular por dichos accesos.

3.9.- LA SEGURIDAD DURANTE LA EXPLOTACIÓN

Como ya hemos dicho, *la seguridad en un túnel, debe ser integral* abarcando todas las fases de la vida de un túnel (proyecto, construcción y explotación) y todas las actividades que se realizan en cada una de ellas.

La seguridad en la etapa de explotación es la que cierra el anillo de la seguridad y tiene una importancia fundamental en el mantenimiento del nivel adecuado de seguridad.



Dando por supuesto que el túnel en su conjunto ha sido diseñado, proyectado y construido para operar con el nivel de seguridad adecuado, durante la fase de explotación, corresponde a los operadores hacer realidad este objetivo.

Englobadas dentro de la fase de explotación, podemos distinguir tres actividades básicas:

- a) El mantenimiento y conservación de equipos y sistemas
- b) La utilización de equipos y sistemas
- c) La gestión integrada de todos los recursos

3.9.1.- El mantenimiento y la conservación

Esta actividad asegura que todos los equipos y sistemas instalados en el túnel funcionan correctamente.

Para conseguir este objetivo, es necesario realizar trabajos sistemáticos de mantenimiento y conservación utilizando el personal técnico adecuado en número y cualificación.

La conservación y el mantenimiento hay que realizarlo siguiendo un plan preestablecido en el que, además de la periodicidad con la que los trabajos deben realizarse, defina un plan de inspección y supervisión de los mismos.

Estos trabajos se realizan en días y horas de un menor tráfico, generalmente durante las horas nocturnas. Cuando se dispone de dos túneles gemelos, es más fácil realizar esta conservación, pudiendo incluso cerrarse un túnel al tráfico, manteniendo el otro en servicio en ambas direcciones, por un corto espacio de tiempo.

Los trabajos de mantenimiento y conservación de los sistemas de detección y de los sistemas de emergencia, son especialmente relevantes. Teniendo en cuenta que en operación normal del túnel, estos sistemas no entran en funcionamiento, es necesario,



con una periodicidad adecuada, provocar su activación, analizando su funcionamiento y perfeccionándolo en el caso de que se observe alguna deficiencia.

Especial atención debe prestarse a los sistemas de suministro de energía eléctrica al túnel, comprobando que, en caso de un corte del suministro en un circuito de alimentación, entre en funcionamiento automáticamente el segundo circuito independiente de alimentación. Además se mantendrá en todo momento dispuesto a entrar en funcionamiento inmediato un sistema de alimentación autónoma mediante grupos electrónicos con la potencia necesaria para mantener en funcionamiento todos los sistemas básicos de emergencia: ventilación, iluminación, agotamiento, teléfonos de emergencia, señalización, puntos de extinción, salidas de emergencia, señalización de rutas de emergencia.

El adecuado funcionamiento de los ventiladores, incluidos los ventiladores de reserva, así como todos los sistemas de control del tráfico y detección de incendios, debe ser también objeto de atención preferente.

Se comprobará también el adecuado funcionamiento de todos los sensores y detectores, sustituyendo aquellos cuyo funcionamiento sea defectuoso.

Se revisará también periódicamente el adecuado funcionamiento de los equipos de lucha contra el fuego: extintores, bocas de incendios de agua y de espuma, etc.

En caso de un incendio en el túnel, los equipos de lucha contra el fuego, tanto internos como externos, necesitarán disponer de una alimentación adecuada de espuma y de agua, siendo necesario disponer del almacenamiento necesario, mediante balsas de gran capacidad.

El mantenimiento y conservación, incluye también la limpieza de calzada, paramentos y techos del túnel.



El adecuado funcionamiento de los sistemas de seguridad tiene una incidencia decisiva en la evitación o la atenuación de accidentes graves en el túnel, de ahí su extraordinaria importancia.

3.9.2.- La utilización de equipos y sistemas

Una vez que hemos puesto de relieve la gran importancia que tiene para la seguridad en los túneles un adecuado estado de funcionamiento de todos los equipos, instalaciones y sistemas, vamos a fijar la atención ahora en el manejo de estos equipos.

Un adecuado manejo y utilización de todos los elementos que componen el equipamiento del túnel, es condición necesaria para una acción eficaz ante una situación de emergencia.

Para conseguir este objetivo, es necesario disponer del número adecuado de operarios para utilizarlos y que estos operarios tengan la capacitación y el adiestramiento necesarios. Es, por tanto, esencial que el personal esté familiarizado con los distintos equipos y tengan un conocimiento profundo, a nivel práctico, de su funcionamiento y uso, mediante la **realización de ejercicios frecuentes**.

Dentro de la utilización de los equipos, haremos referencia a la conveniencia de que los usuarios dispongan de información precisa de los sistemas de seguridad instalados en el túnel, facilitándoles información gráfica de ellos, e incluso dándoles la posibilidad de que se familiaricen con ellos mediante su manejo en las áreas de servicio próximas al túnel.

3.9.3.- La gestión integrada de todos los servicios.

La eficacia de un plan de acción ante una situación de emergencia, exige:

- acción estructurada y coordinada
- rapidez de acción



La actuación ante una emergencia es siempre compleja tanto por la propia acción, como por las situaciones imprevisibles que se pueden plantear ante una situación de emergencia.

Partiendo de que todos los equipos funcionan y son utilizados adecuadamente, es necesario realizar **una acción coordinada** y además, para que sea de la mayor eficacia, **esta acción debe ser rápida**.

La acción de los equipos de emergencia debe ser estructurada previamente y después ensayada.

La estructuración de las diferentes actuaciones, necesita el desarrollo de procedimientos específicos para cada una de ellas.

La elaboración de la metodología de acción de las distintas actividades, corresponde al departamento de ingeniería de la oficina de control, siendo el máximo responsable el Director del Departamento que estará asistido por el personal técnico necesario entre el que debe estar incluido un ingeniero o técnico de seguridad.

La elaboración de estos procedimientos, exige el conocimiento de sistemas específicos para combatir una situación de emergencia concreta y la utilización de conocimientos de ingeniería de seguridad en distintos campos como: la lucha contra el fuego o contra el derrame de sustancias químicas peligrosas.

Será necesario, por tanto, redactar procedimientos de acción de:

- evacuación
- lucha contra el fuego
- rescate y salvamento

Una vez redactados estos procedimientos, deberán ser verificados y chequeados regularmente.



Es también función del Departamento técnico, desarrollar estrategias eficaces de acción ante situaciones de emergencia. Los procedimientos desarrollados estarán sujetos a revisiones y modificaciones periódicas tomando en consideración para ello las experiencias propias y las ajenas, y transmitiéndolas en reuniones periódicas entre los distintos explotadores.

Antes de la inauguración de un túnel, debe comprobarse el adecuado funcionamiento de todas las instalaciones y equipos del túnel, tanto en situación de tráfico normal, como en situación de emergencia, debiendo provocarse una situación de emergencia en la que intervengan todos los equipos de evacuación, rescate y lucha contra el fuego.

Con la periodicidad conveniente, como ya hemos dicho, deberán realizarse ensayos similares para mantener el adecuado funcionamiento de los sistemas y el adecuado nivel de adiestramiento de los servicios de emergencia, tanto internos como externos.

Corresponde al Director del Centro de Control, la responsabilidad máxima de promover, coordinar, supervisar y dirigir la implantación de la seguridad en el túnel y de dirigir las actuaciones en caso de emergencia.

En la Figura 19 se indica un esquema organizador de la operación de un túnel.

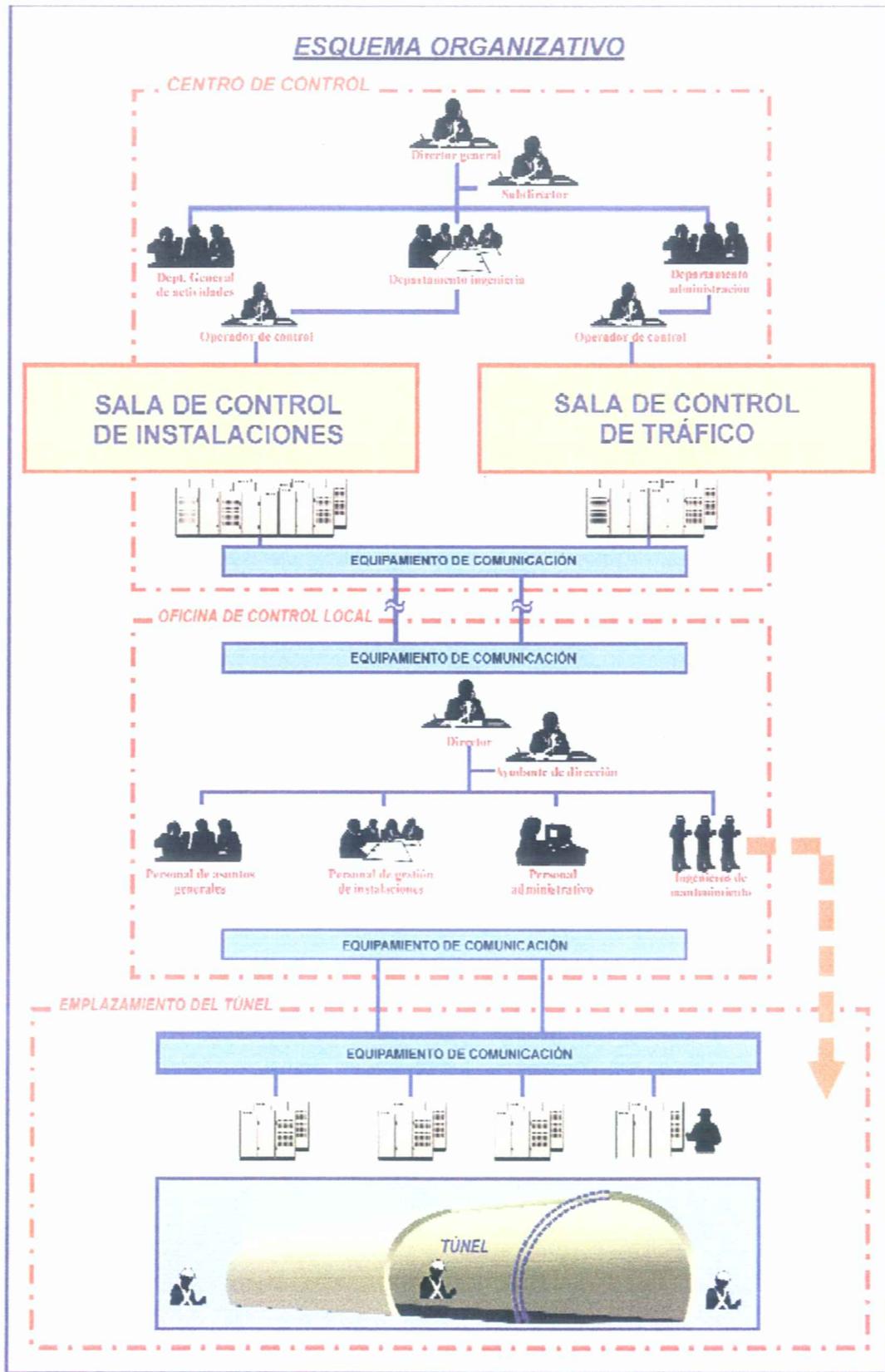


Figura 19.- ESQUEMA ORGANIZADOR DE LA OPERACIÓN DE UN TÚNEL.

CONCLUSIONES

1 El tránsito de vehículos a través de un túnel debe realizarse con el mismo nivel de seguridad que el tránsito a través de un tramo equivalente, al aire libre, de la carretera a la que pertenece.

Con independencia de su longitud y de su densidad de tráfico, los túneles deben ofrecer un nivel equivalente de seguridad al tránsito.

Conseguir un nivel de seguridad aceptable durante el periodo de explotación, debe ser el objetivo final del Diseño, la Construcción y la Operación de un túnel.

El diseño y dimensionamiento del equipamiento de los Sistemas de Emergencia y de Seguridad, tiene una gran influencia en la reducción del nivel de riesgo y deben realizarse en consonancia con las características de cada túnel: longitud, densidad de tráfico, modalidad de tráfico (unidireccional-bidireccional), proporción de vehículos pesados, entorno (urbano, túnel submarino o subfluvial...).

2 El diseño del túnel con su equipamiento completo debe realizarse de modo que la probabilidad de que se produzcan accidentes graves dentro del túnel (varios muertos), se reduzca exponencialmente, en comparación con la probabilidad de que se produzcan accidentes de menor gravedad (algún muerto).

Se hace necesario, por tanto, definir en el proyecto el nivel de riesgo para distintas situaciones o escenarios de incendio, calculando las probabilidades de que un determinado accidente se produzca.

Los accidentes muy graves, como los recientemente producidos en los túneles del Montblanc y Tauern, tienen que ser evitados con los medios necesarios que proporciona el nivel tecnológico actual.

La razón principal es la importante pérdida de vidas humanas que ocasionan y la importancia, en sí misma, de estas pérdidas.

Pero además, el efecto psicológico traumático que crean en la opinión pública, es especialmente pernicioso al inducir en la opinión pública una percepción subjetiva de que los túneles son más inseguros de lo que en realidad son. Según las estadísticas, el

número de accidentes producidos en los túneles es menor que el de los producidos en los tramos equivalentes, al aire libre, de la carretera a la que pertenecen.

3

La sociedad demanda de forma continuada, mayores niveles de seguridad en la realización de sus actividades (Cultura de la Seguridad). Esta exigencia de mayores niveles de seguridad, junto con la presión sobre el tráfico del incremento de la actividad económica y de la movilidad de los ciudadanos, inducirá durante los años venideros, en lo que a los túneles se refiere, un incremento en la construcción de túneles, tanto por la necesidad de desdoblarse los ya existentes, como la de diseñar y construir nuevos túneles en nuevas rutas viarias con niveles de seguridad en consonancia con las exigencias de la Sociedad.

4

En relación con los accidentes, debe concentrarse la principal actuación en evitar que éstos se produzcan.

- Algunas de las medidas que pueden adoptarse para evitar los accidentes en los túneles son:
 - Control eficaz del tráfico en las proximidades y dentro del túnel
 - Control de la velocidad de circulación de vehículos y camiones
 - Control de la distancia entre vehículos (50 m. entre vehículos ligeros y 100 m. entre vehículos pesados, limitando su velocidad).
 - Dotar a los autocares y camiones de gran tonelaje de dispositivos de localización a distancia.
 - Limitar, regular e, incluso, impedir el tráfico de sustancias peligrosas en determinadas condiciones.
 - Control electrónico de tapones dentro del túnel que actúe automáticamente sobre el sistema de control del tráfico.
 - Detección temprana de incendios

- Utilización de rayos infrarrojos y ultravioleta para localizar puntos de concentración de calor.
 - Detectores de temperatura, gases (CO, NO_x, ..), medidores de visibilidad,...
- En caso de incendio, extraer, eficazmente, los humos y gases evitando por todos los medios, que éstos se difundan por toda la sección y a lo largo del túnel, manteniendo los humos en la parte superior de la sección, de modo que permitan un pasillo de evacuación libre de humos y gases a lo largo del túnel (\simeq 2m.de altura).
- En cualquier caso, se impedirá que el tapón de humos y gases se mueva libremente a lo largo del túnel.
- En condiciones normales, el incendio de un vehículo o un camión dentro de un túnel, puede ser controlado sin dificultad utilizando los sistemas de extinción instalados en el túnel; sin embargo una actuación inadecuada del conductor o cuando se transportan sustancias peligrosas, puede ocasionar un desastre dentro del túnel.
- Disponer del sistema de emergencia y seguridad adecuado a las características de cada túnel.
- Rutas de evacuación y salidas de emergencia cada 350 m. con galerías de conexión entre tubos.
 - Disponer de refugios resistentes al fuego cada 600-700 m. dotados de un sistema de ventilación independiente.
 - Disponer de equipos propios de lucha contra el fuego operativos en todo momento y entrenados. En un futuro próximo, será necesario diseñar vehículos específicos para luchar contra el fuego en túneles.
 - Disponer de un Equipo de Rescate con medios adecuados a las características de cada túnel.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Dimensioning Semi-Cross Ventilation Systems for cases of Emergency (C. Steinert) Tunnel 1/99 (pág 4 2-45), Tunnel 2/99 (pág. 36-52)
- Safe Travelling in road and rail tunnels. (Rodney Craig). Tunnel and Tunnelling (Marzo-99), (pág 34-36)
- Fire and Life Safety for Underground Facilities. Present Status of Fire and Life Safety principles related to Underground Facilities. (ITA Working Group 4, Subsurface Planning.- 1998) Annica Nordmark.- Tunnelling and Underground Space Technology Vol. 13, nº 3, 1998
- Safety Requirement and Regulations Reviews on Ventilation and Fire for Tunnels in the Hong Kong Special Administrative Region. W.K. Chow, Jojo S.M.Li.- Tunnelling and Underground Space Technology Vol. 14, nº 1, 1999 (Pag. 13-21)
- Safety Systems for the Trans.-Tokyo Bay Highway Tunnel Project. N. Yamada and Y. Ota. Tunnelling and Underground Space Technology Vol. 14, nº 1, 1999 (Pág. 3-12).
- Effects of fire on tunnel lining stability. Tunnel and Tunnelling Oct. 1998 (Pág. 30-41)
- Fans for vehicular tunnels. Tunnel and Tunnelling sept. 1998 (Pág. 62-65).
- Fire safety engineering and management of tunnels. Tunnel and Tunnelling Jun. 1998. (Pág. 34-36).
- The changing needs of road tunnel ventilation. (J. Day). Tunnel Management International 1999. (Pág. 22-24)
- Tunnel operation: Is there sufficient user safety?. W. Baltzer. Tunnel Management International.
- Fire hazards in tunnels: Changes. D. Brown. Tunnel Management International (Pág. 16-18).
- New fire detection concepts with fibre optics technology. H. Wigger. Tunnel Management International.



- The Westerschelde tunnel: Integrated safety philosophy. E.W. Worm. Tunnel Management International (Pág. 26-28).
- Crisis management in long road tunnels. Tatsuro Yoshimochi, Toshio Morimoto. Tunnel Management International (Pág. 30-33).
- Tunnel Incident Management. First International Conference Korsor, Denmark, 13-15 May 1996

