

Juan Carlos Muñoz Matías

PARTE 4

INCENDIOS EN TÚNELES

Manual de incendios

Coordinadores de la colección

Agustín de la Herrán Souto
José Carlos Martínez Collado
Alejandro Cabrera Ayllón



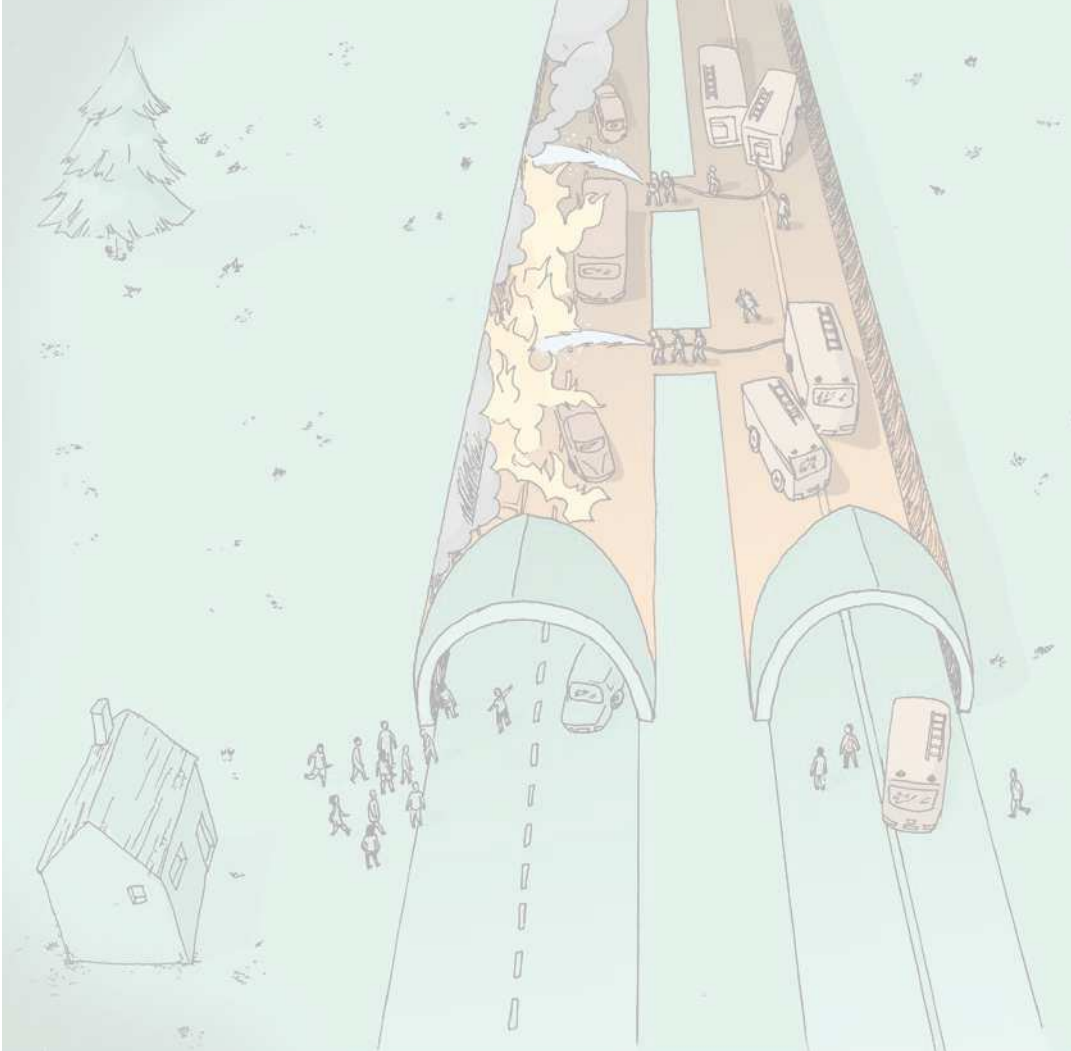
Documento bajo licencia Creative Commons CC BY-NC-SA 4.0 elaborado por Grupo Tragsa y CEIS Guadalajara. No se permite un uso comercial de la obra original ni de las posibles obras derivadas, la distribución de las cuales se debe hacer con una licencia igual a la que regula la obra original. Asimismo, no se podrán distribuir o modificar las imágenes contenidas en este manual sin la autorización previa de los autores o propietarios originales aquí indicados.

Edición r1 2015.10.05

manualesbb@ceisguadalajara.es
www.ceisguadalajara.es

Tratamiento
pedagógico, diseño y
producción

 Griker
Orgemer



CAPÍTULO

1

Caracterización

1. VALOR PEDAGÓGICO DEL ESTUDIOS DE LOS INCENDIOS EN TÚNELES

Los incendios en túneles cuentan con una serie de particularidades que los hacen especialmente interesantes para ilustrar algunas de las técnicas y características presentadas en el ámbito de los incendios de interior y la ventilación. Planteando diferentes soluciones a algunas de las dificultades específicas que presentan este tipo de infraestructuras es posible profundizar en el análisis de diferentes técnicas y formas de intervención, que ayudarán a entender qué tipo de planteamiento se debe utilizar en otros incendios específicos (chimeneas, vertederos, vehículos, edificios de gran altura, etc.).



Imagen 1. Partes de un túnel

2. CARACTERÍSTICAS DE LOS TÚNELES

2.1. PARTES DE UN TÚNEL

La Real Academia Española define túnel como un “paso subterráneo abierto artificialmente para establecer una comunicación”. Habitualmente, en un túnel se identifican las siguientes partes:

- **Clave:** es la parte más alta del túnel. Es habitualmente curva, aunque será plana en túneles rectangulares.
- **Gálibo:** es la altura/anchura libre que hay sobre la calzada o zona de circulación de vehículos. Siempre es menor que la altura de la clave/anchura del túnel.
- **Hastiales:** son los laterales izquierdo y derecho del túnel. Suelen estar forrados con chapa cuando el túnel no está revestido de hormigón y pueden ser rectos o curvos.
- **Bocas:** son los pórticos por los que se entra y se sale del túnel.
- **Calzadas:** es el firme por donde circulan los vehículos.
- **Aceras:** están situadas a cada lado de la calzada. Son planas y libres de obstáculos, con una anchura mínima que permita el paso de dos personas en paralelo. También ha de disponer de pasamanos en el hastial que sirva de guía táctil, de gran utilidad en el caso de que el humo dificulte la visibilidad.
- **Cunetas:** es la zona que hay a ambos lados del túnel y que sirve para recoger el agua que se filtra a través del terreno.
- **Apartaderos:** permiten que los vehículos se detengan en un túnel sin bloquear el carril de circulación, reduciendo las molestias al tráfico y el riesgo de colisión. En un túnel bidireccional se dispondrá de este equipamiento a >1500 metros. Si la IMD (Intensidad Media Diaria) es >2000 vehículos, será cada 1000 metros.

2.2. TIPOS DE TÚNELES

Existen diferentes clasificaciones de túneles en función de sus características. Aspectos como su ubicación, la forma en que se construyen, su cometido, el tipo de tránsito que permiten, la dirección de la circulación y el tipo de revestimientos que presentan influirán en el tipo de intervención que debe llevarse a cabo en el caso de que se produzca un incendio en su interior. (Tabla 1)

2.3. INSTALACIONES DE SEGURIDAD Y RELACIONADAS CON LA INTERVENCIÓN EN INCENDIOS DE TÚNELES

A pesar de que no existe mayor probabilidad de que se produzca un accidente en el interior de un túnel que en otros puntos del trazado de las carreteras, las dificultades de rescate o evacuación y la peligrosidad provocada por el confinamiento en estos incidentes afecta de forma significativa a la seguridad de los usuarios. Por ello es necesario que el túnel cuente con algunos sistemas o instalaciones que garanticen una evacuación rápida, segura y adecuada para el usuario, a la par que minimicen el daño que el incendio pueda causar y faciliten la intervención de medios externos.

Entre este tipo de infraestructuras se encuentran:

- Los sistemas de señalización.
- Las vías de evacuación.
- Los sistemas de suministro energético.
- Los sistemas de iluminación.
- Los sistemas de comunicación.
- Los sistemas de detección y lucha contra incendios.
- Los sistemas de ventilación.

2.3.1. SISTEMA DE SEÑALIZACIÓN

En el caso de España, para túneles construidos con anterioridad a 2006, la señalización de emergencia consistía en un único pictograma ubicado sobre



Tabla 1. Diferentes tipologías de túneles

Tipología	Clases	Características
Ubicación	Urbanos	Situados en el trazado de vías urbanas. Ya sea dentro de una población o en sus proximidades.
	No urbanos	Situados fuera del núcleo urbano; es decir, en el trazado de las carreteras interurbanas.
Forma de construcción	Trinchera	Se abren mediante una excavación a cielo abierto y se recubren posteriormente con un forjado superior para permitir el tránsito de vehículos a dos niveles distintos.
	Recubiertos	Se construyen primero excavando el terreno, después se disponen uno o dos tubos y, por último, se recubren con rellenos.
	Excavados	La cavidad deseada se abre en la roca o en el suelo y posteriormente se sostiene el terreno para permitir el tránsito.
Cometido	Prefabricados	Están constituidos por piezas que se van ensamblando. Por lo general, se realizan para salvar cursos de agua.
	Terrestres	Atraviesan el terreno.
	Fluviales	Atraviesan ríos o lagos.
Tránsito	Marinos	Atraviesan el mar.
	Carretero	Tráfico rodado.
Dirección de circulación	Ferrovionario	Ferrocarriles.
	Sentido único	Es muy común en autovías y autopistas. Cada sentido transita por un tubo diferente.
Tipo de revestimiento	Dos sentidos	Se ha construido un único tubo para la carretera con doble sentido que lo transita.
	Con revestimiento	De hormigón, lo que les confiere una mayor resistencia frente a los desprendimientos y un comportamiento más laminar del flujo de aire de ventilación.
	Sin revestimiento	No presentan acabado final: el terreno excavado queda a la vista.

la propia salida de evacuación; por tanto, difícilmente distinguible a cierta distancia. El Real Decreto (RD) 635/2006 establece la obligación de emplear señalización fotoluminiscente a lo largo de todo el recorrido del túnel, que indique las distancias a las salidas de evacuación más próximas en ambos sentidos.

Concretamente, en su Anexo III, el citado RD especifica las condiciones que debe cumplir la señalización de cara a facilitar a los usuarios su identificación y utilización en condiciones adecuadas de seguridad. En relación con las señales viales que identifiquen las salidas de emergencia, establece

que se utilizará la misma señal para todos los tipos de salidas de emergencia, siendo necesario señalizar en las paredes (a distancias no superiores a 25 metros y a una altura de entre 1 y 1,5 metros por encima del nivel de la vía de evacuación) las dos salidas de emergencia más próximas y la distancia que hay hasta ellas.

Igualmente, a la entrada del túnel, debe existir una señal que informe de la longitud del mismo y de las medidas de seguridad con las que cuenta para que el conductor las conozca de antemano. En el caso de los túneles con longitud superior a 3000 metros, se indicará cada 1000 metros la longitud restante del túnel con este mismo tipo de señal.

2.3.2. VÍAS DE EVACUACIÓN



a) Tipos de vías de evacuación

La **evacuación** de un túnel tiene como objetivo trasladar a sus usuarios hasta un lugar seguro y realizar este desplazamiento en condiciones adecuadas.

Existen dos tipos de vías de evacuación:

- **Vías de evacuación no protegidas:** son aquellas que discurren por el propio túnel, sin existir una separación física del mismo, de forma que no constituyen un recinto independiente. Constituyen el único camino de evacuación para túneles de poca longitud.
- **Vías de evacuación protegidas:** son aquellas que se encuentran físicamente separadas del túnel, y constituyen un recinto independiente. Se persigue que las personas salgan del túnel incendiado por su propio pie sin estar sometidas al ambiente de humo y calor que origina el incendio. Se deben dotar de vías de evacuación protegidas a los túneles que superen los 400 metros. Los túneles de gran longitud deben contar con accesos a vías de evacuación protegidas a las distancias que se recogen en el siguiente cuadro:

Tabla 2. Distancia entre accesos según el tipo de túnel

Tipo de túnel	Ubicación y tráfico	Distancia entre accesos
Unidireccional	Interurbano sin retenciones	400 metros
	Urbano o interurbano con retenciones	200 metros
Bidireccional	Interurbano sin retenciones	400 metros
	Urbano o interurbano con retenciones*	150 metros

(Fuente: RD 635/2006)

* Se considera túnel interurbano con retenciones si estas se producen más de cinco días al año y no se dispone de control de acceso

- **Salidas de emergencia**

El sistema de evacuación dispone de una o varias **salidas de emergencia** (debidamente señalizadas) para el tramo comprendido entre la boca de acceso y la salida del túnel. Las salidas de emergencia se deberán utilizar en caso de accidente grave, incendio o vertido de materias peligrosas. En su diseño habrá que tener en cuenta muy especialmente los efectos psicológicos que se derivan en la persona por el hecho de haber sufrido un accidente o ser víctima de un incendio en el interior de un túnel. Los esquemas de señalización y comunicación deben ser muy claros y su aparellaje suficientemente resistente al choque o al fuego.

Las **salidas de emergencia** pueden ser:

- Salidas directas del túnel al exterior
- Conexiones transversales entre tubos de túnel
- Salidas a galería de emergencia.

Puesto que las vías de evacuación protegidas deben ser recintos seguros, sus elementos delimitadores deben atender a las siguientes especificaciones durante un determinado período de tiempo:

- **Estabilidad al fuego**, está construido por materiales que no alteran su función mecánica debido a la acción del fuego.
- **Resistencia al fuego**, sus materiales o elementos de construcción impiden el paso de las llamas o gases calientes. Por este motivo no se generan en ellos fisuras, orificios, grietas u otras aberturas.
- **No emisión de gases inflamables**, no generan ni emiten gases en su cara no expuesta al fuego.
- **Resistencia térmica**, dificultan la transmisión de calor a través de él. Concretamente, evita que:
 - La temperatura en la cara no expuesta al fuego sufra un incremento con relación a la temperatura inicial mayor de 180°C en cualquiera de sus puntos
 - La media se incremente en más de 140°C
 - En todo caso, se alcancen los 220°C

- **Galerías de evacuación**

Las posibilidades de evacuación de un túnel vienen determinadas por la disposición que adopten las **galerías de evacuación**. Se describen a continuación los casos más comunes:

- **Dos tubos paralelos.**

Cuando el túnel cuenta con dos tubos independientes (túneles unidireccionales), se comunican ambos tubos de tal forma que el tubo no incendiado se utiliza como vía de evacuación protegida. Para este tipo de túneles se deben construir galerías de interconexión situadas a distancias periódicas que permitan el paso de un tubo a otro, tanto de personas como de vehículos.

- **Galería paralela al túnel**

En este caso, será esta galería paralela la que se utilizará como vía de evacuación protegida, debiendo existir las correspondientes conexiones entre el túnel y la galería de evacuación. Estas galerías normalmente se presurizan para impedir la entrada de humos durante la emergencia.

- **Galería bajo la calzada**

Se trata de una galería inferior que recorre el túnel de principio a fin y a la que se accede a través de las salidas de emergencia y unas rampas de evacuación. Cuenta con la ventaja de no tener que excavar una galería independiente, ya que esta se excava a la vez que el túnel.

- **Galería en la clave**

Este tipo de galerías de evacuación se utiliza frecuentemente en los túneles que cuentan con ventilación semitransversal o transversal, donde la galería superior por la que se insufla el aire limpio se utiliza como galería de evacuación. De este modo, la galería se encuentra presurizada y asegura que cuenta con aire limpio. El acceso a esta galería se realiza a través de las salidas de emergencia y rampas verticales que conducen a la misma. Cuenta con la ventaja de aprovechar la galería de ventilación y no ser necesario construir una galería exclusiva para la evacuación.

- **Galería ascendente**

Estas galerías ascienden para llegar a la mayor brevedad posible a la superficie exterior.

- **No existe galería de evacuación**

Cuando el túnel no cuenta con una galería de evacuación, debe contar con salidas de emergencia situadas a lo largo del túnel que lo comunican directamente con puntos intermedios del exterior. Por ejemplo, esta situación podría darse en un túnel de carretera de gran longitud.

b) Factores que influyen en la eficacia de la evacuación:

Existen distintos factores técnicos y humanos que influyen en la eficacia de la evacuación. Entre los factores **técnicos** destacan las características de las vías de evacuación (galerías y salidas de emergencia) y la existencia de un plan de emergencia adecuado.

La existencia de unas vías de evacuación correctamente dimensionadas no garantiza el éxito de una evacuación. Para que sea efectiva debe existir, incluido en el manual de explotación del túnel, un **Plan de emergencias** que contemple la evacuación. En España, este manual es obligatorio para todos los túneles de la red de carreteras, con la única excepción de los túneles no urbanos de longitud inferior a 200 metros.

Cuando se diseña el Plan de emergencias, se deben tener en cuenta las características inherentes al túnel, ya que van a incidir en el tipo de evacuación que se realice.

Entre los factores **humanos** destacan el nivel de preparación de personal y la información disponible para los usuarios:

- El personal que constituye los equipos de evacuación debe liderar y dirigir dicha evacuación y proporcionar una respuesta rápida y eficaz. Para conseguir este objetivo se deben realizar simulacros periódicos que permitan entrenar debidamente este tipo de conductas.
- Los conductores deben obtener respuestas automáticas que neutralicen las actitudes de bloqueo que se pueden producir en situaciones de emergencia por el exceso de información extraordinaria que se recibe de forma muy rápida, con connotaciones negativas para la supervivencia.



Recapitulando, de cara a facilitar una correcta evacuación, el túnel debe contar con:

- Una señalización clara y perfectamente identificable que encamine al usuario hacia las salidas de evacuación.
- Un correcto alumbrado de las vías de evacuación protegidas, una iluminación de emergencia que funcione en caso de fallo de suministro eléctrico y un marcado con pintura luminiscente de los recorridos por vías de evacuación no protegidas hasta las salidas de emergencia más próximas o al exterior.
- Una señal que informe de su longitud y de las medidas de seguridad con las que cuenta, para que el conductor las conozca de antemano.

2.3.3. SISTEMA DE SUMINISTRO ENERGÉTICO

Dado que tiene por objeto dotar de suministro eléctrico a todas las instalaciones de seguridad del túnel, el suministro de energía debe ser el adecuado para el funcionamiento de dichas instalaciones. En determinados túneles habrá que prever el doble abastecimiento y la instalación de generadores de emergencia, así como un sistema de alimentación ininterrumpida (SAI) que cubra el servicio hasta que los generadores se pongan en funcionamiento.



2.3.4. SISTEMA DE ILUMINACIÓN

El alumbrado de un túnel se justifica fundamentalmente por razones de seguridad. Tiene por objeto evitar o reducir a límites tolerables los cambios bruscos de luminosidad que afectan negativamente a la retina del ojo, con objeto de conseguir una mejor adaptación del conductor a través de una transición gradual.



Los túneles presentan dos tipos de iluminación, la de servicio normal y la de emergencia.

La **iluminación de servicio normal** pretende que el conductor se vea mínimamente afectado al pasar de un espacio con luz y abierto, a otro oscuro (túnel) y viceversa. Para lograr que dicho cambio sea progresivo, habitualmente se fijan unas zonas de transición a la entrada y salida del túnel con diferente graduación lumínica tanto en túneles urbanos como en interurbanos con una longitud superior a 200 metros.

La **iluminación de emergencia** tiene como objeto que el túnel no se quede a oscuras ante la falta de suministro eléctrico. Esta es necesaria a partir de una determinada longitud:

- **Superior a 200 metros** en túneles **urbanos** o **interurbanos con retenciones**.
- **Superior a 500 metros** en túneles **interurbanos**.

2.3.5. SISTEMA DE COMUNICACIÓN



Dado que la comunicación suele ser problemática en las infraestructuras subterráneas, se debe contar con sistemas que aseguren las comunicaciones vía radio entre los equipos de emergencia en caso de intervención.

Igualmente, se ha de contar con sistemas que permitan la comunicación entre los usuarios del túnel y el centro de control del mismo. A tal efecto existen interfonos instalados en los postes S.O.S. que hay en el túnel. Cuentan con un pulsador que envía una llamada al centro de control, con un micrófono y un altavoz para hablar y escuchar. Se encuentran cada 50 o 100 metros, en el lado derecho (túnel unidireccional), o en ambos lados (túnel bidireccional).

a) Comunicaciones para equipos de emergencia

La banda de frecuencia para voz, datos y vídeo bidireccional más efectiva y aceptada es VHF. Sin embargo, estas frecuencias no pueden penetrar la roca, debido al alto nivel de atenuación que experimentan. Si bien existen diversos métodos disponibles para la distribución de voz y datos bajo tierra, el sistema más común es el denominado **sistema cable radiante**.

La correcta instalación del sistema garantiza un buen nivel de señal en toda la red y, por lo tanto, en todo el tramo del túnel carretero.

En el caso de España este cable radiante se instala para asegurar diferentes coberturas:

- Cobertura TETRA, para cuerpos de emergencia: bomberos, policías municipales y equipos sanitarios
- Cobertura TETRAPOL, para cuerpos de seguridad (policía)

Además, el sistema se suele utilizar para dar una red de servicios adicionales:

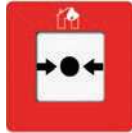
- Ocho canales de FM Comercial (emisoras de radio para los usuarios del túnel y para comunicación del centro de control a los conductores)

- Dos canales para Mantenimiento

Otro sistema empleado para proporcionar comunicaciones subterráneas es el de **antenas distribuidas**. Su instalación exige:

- Zonificación del espacio a comunicar.
- Cada zona ha de contar con una antena y un amplificador.
- Las antenas deben estar cableadas entre sí (normalmente con fibra óptica).

2.3.6. SISTEMAS DE DETECCIÓN DE INCENDIOS



El sistema de detección de incendios es obligatorio para túneles interurbanos sin congestión a partir de 500 metros y para túneles urbanos e interurbanos con congestión a partir de 200 metros.

Estos sistemas tienen como finalidad detectar el incendio en su fase inicial para que, desde la sala de control, se proceda a realizar las actuaciones oportunas (cambios en la ventilación, activación del sistema de extinción, etc.) de forma manual o automática.

Para la detección de incendios se suele instalar en la clave de todo el túnel un cable fibrolaser, que tiene la particularidad de que al calentarse cambian las condiciones de transmisión de la luz que lo recorre.

Los principales sistemas **homologados** se basan en las siguientes tecnologías:

- Cable de cobre con aislamiento que se funde y varía su resistencia.
- Variación de presión en un tubo lleno de aire.
- Sensores de temperatura uniformemente distribuidos.
- Análisis de características de una fibra óptica (fibrolaser).



En todo caso, el túnel deberá estar equipado con los sistemas de detección y extinción de incendios que mejor se adapten a sus características. El proyecto, igualmente, deberá contemplar esta circunstancia y analizarla con todo detalle de cara a incorporar en el diseño de las instalaciones (especialmente de la ventilación), los medios necesarios para reducir al máximo e incluso evitar los efectos que pueda producir el incendio.

El manual de explotación del túnel recogerá detalladamente las sucesivas actuaciones que se han de acometer en caso de incendio, y las medidas permanentes de mantenimiento y conservación para que la totalidad del sistema (ventiladores, detectores de fuego, tuberías, sistemas de comunicación, etc.) esté en todo momento en condiciones óptimas de servicio.

Los principales sistemas **no homologados** se basan en las siguientes tecnologías:

- Análisis de imágenes CCTV (DAI). Se trata de sistemas automatizados de control. Saltan alarmas al controlador en caso de detectarse altas temperaturas, vehículos en sentido contrario, exceso de velocidad, etc.
- Incremento de monóxido de carbono (CO).
- Incremento de opacidad.

Por su dificultad de implantación existen otros sistemas menos empleados, como pueden ser los detectores de llama.

2.3.7. SISTEMAS DE LUCHA CONTRA INCENDIOS



Las instalaciones constan de una o más fuentes de abastecimiento, con su correspondiente equipo de bombeo, y de unos armarios equipados con:

- Mangueras.
- Lanzas.
- Espumógeno.
- Dosificador de espuma.
- Extintor.

Se establece, además, que todos los puestos de emergencia del túnel deben estar equipados como mínimo con un teléfono de emergencia y dos extintores. Cuando los puestos de emergencia sean exigibles, este equipamiento debe situarse en el interior, cerca de las bocas, a intervalos no superiores a 150 metros para los nuevos túneles construidos a partir de 2006, y a intervalos no superiores a los 250 metros para los túneles preexistentes.

Otras posibles instalaciones son:

- Bies.
- Columna Seca.
- Grupos de Presión.
- Instalaciones de Extinción de Incendios (rociadores, nebulizadores).
- Sistema Hidrante (cada 250 metros).

2.3.8. SISTEMAS DE VENTILACIÓN DEL TÚNEL



a) Ventilación natural

El túnel se ventila mediante los efectos climatológicos (viento, diferencia de presión, diferencia de temperatura) o por el efecto del tráfico. Lo normal es que éste sistema sólo pueda ser empleado en túneles muy cortos y nunca está permitido utilizar este tipo de ventilación cuando el tráfico es bidireccional.

b) Ventilación forzada o artificial

La ventilación está constituida por un conjunto de ventiladores y conductos destinados a dirigir y canalizar el aire fresco y los humos.

En España el REAL DECRETO 635/2006, de 26 de mayo, establece la necesidad de **ventilación artificial** para todos los túneles con una longitud superior a 500 metros, y para los túneles urbanos de longitud igual o menor que 500 metros y mayor que 200 metros con el correspondiente **sistema automático de control**. Este sistema de ventilación también deberá tener en cuenta el control del calor y el humo en caso de incendio y el control de los contaminantes emitidos por los vehículos en un flujo de tráfico normal y denso, así como en caso de congestión a causa de un accidente.

Asimismo, la normativa establece que en la fase de proyecto de la instalación del sistema de ventilación de la infraestructura subterránea se deberá poder extraer el humo para un incendio tipo con potencia mínima de 30 MW y caudal mínimo de humos de 120 m³/s.

En función de las características del túnel existen diferentes tipos de ventilación: longitudinal, transversal y semitransversal.

- **Sistemas de ventilación longitudinal**

Consiste en ventilar el túnel haciendo circular el aire en un único sentido (en los túneles unidireccionales generalmente coincide con el sentido de circulación del tráfico, para aprovechar el efecto pistón), de manera que el aire que se succiona por una boca se expulsa por la otra. Los ventiladores suelen ser reversibles, especialmente en el caso de túneles bidireccionales, para poder aprovechar la ventilación natural en el sentido en que esta se produzca. Por tanto, el objetivo de un sistema longitudinal es crear condiciones adecuadas para la evacuación aguas arriba del foco de incendio, aunque se creen condiciones muy desfavorables aguas abajo.

En este sistema se disponen de ventiladores axiales que impulsan el aire desde una boca hasta la contraria. La colocación de este tipo de ventilación tiene ventajas e inconvenientes. (Ver tabla 3)



Por esta razón, este tipo de ventilación normalmente se usa en túneles unidireccionales que, además, no tengan previstos periodos de congestión de tráfico. Resulta fundamental tener recogida esta situación cuando se diseña el sistema de ventilación.

Para salvar el principal inconveniente de este tipo de túneles se instala una **ventilación longitudinal con extracción masiva de humo**, que funciona de forma análoga a la ventilación longitudinal normal. Se disponen pozos intermedios por donde, en caso de incendio, se expulsa el humo al exterior.

Esta instalación se recomienda para túneles largos de circulación unidireccional y conlleva ciertas ventajas e inconvenientes. (Ver tabla 4)

- **Sistemas de ventilación semitransversal y transversal**

Los sistemas de ventilación transversal y semitransversal se utilizarán en aquellos túneles que requieran un sistema de ventilación mecánica y en los que no se haya autorizado una ventilación longitudinal. Deberán controlar constantemente la velocidad del aire longitudinal y dispondrán sistemas que eviten la propagación de humo y calor a las salidas de emergencia.

Este tipo de sistemas crea una capa de humo próxima a la clave y la mantiene en una zona relativamente pequeña.

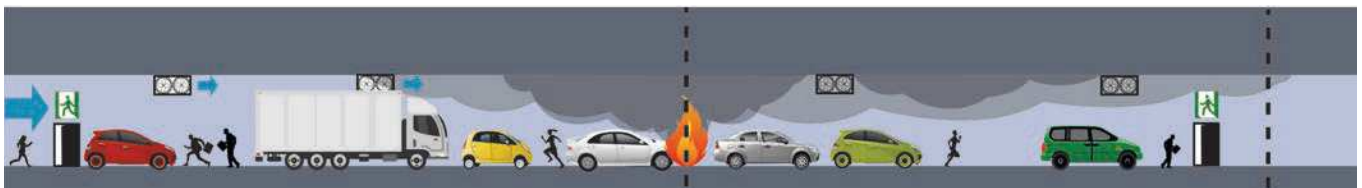


Imagen 2. Túnel de ventilación longitudinal

Tabla 3. Características de la ventilación longitudinal

Ventajas	Inconvenientes
Gran ahorro de energía, ya que si la energía dinámica producida por los vehículos en tránsito es suficiente, estos ventiladores no se ponen en funcionamiento	En caso de congestión es difícil controlar las condiciones de ventilación

Tabla 4. Túnel de ventilación longitudinal con extracción masiva de humo

Ventajas	Inconvenientes
Posibilidad de realizar túneles de mayor longitud	Necesidad de construcción de pozos de ventilación



Imagen 3. Túnel de ventilación longitudinal con extracción masiva de humo

Para que esa capa se mantenga en el estrato superior es importante que el flujo de aire dentro del túnel tenga una velocidad baja (alrededor de 1 m/s y siempre menos de 2m/s). Si la velocidad se incrementa, se pierde la estratificación de la capa de humo y esto afecta a las personas que se están evacuando por debajo de la misma.

• **Ventilación semitransversal**

En la ventilación semitransversal el aire fresco se impulsa desde el exterior por un conducto situado dentro de la sección del túnel, habitualmente en la clave y separado de la zona de circulación de los vehículos por un falso techo. Aproximadamente cada seis metros este conducto comunica con el interior del túnel, mediante unos difusores por los que entra el aire fresco. El aire viciado circula a lo largo del propio túnel y sale al exterior por las bocas. Cuando hay un incendio, en lugar de inyectar aire empieza a extraer humo por las toberas, invirtiéndose el sentido del flujo de aire. Lo normal es que se concentre la extracción en la zona del incendio y se cierran los demás puntos de extracción mediante compuertas contra el humo. El aire fresco que reemplaza al humo extraído proviene de las bocas del túnel, lo que crea un flujo de aire que ayuda a mantener el humo (impide que se extienda) en la zona del incendio.

Recomendado para túneles de circulación bidireccional largos o unidireccional muy largos y/o con posibilidad de congestión.



Imagen 4. Ventilación semitransversal

• **Ventilación transversal**

En la ventilación transversal, tanto el aire fresco como el aire viciado circulan a lo largo del túnel por unos conductos situados, generalmente, en la clave del túnel, separados de la zona ocupada por los vehículos por un falso techo y con un tabique divisorio entre ambos. De este modo se impulsa aire fresco a su interior y se aspira el aire viciado.

Por otra parte, la seguridad en caso de incendio es mayor, ya que se aspira el humo y se impulsa aire fresco simultáneamente en la zona concreta donde se produce el fuego, con lo que se incrementa la capacidad para evacuar los humos y gases tóxicos.

La extracción se concentra en los puntos próximos al foco de fuego (o en una zona determinada si el túnel está dividido en zonas). En la zona del incendio se cierra un porcentaje importante de los puntos de entrada de aire para crear un flujo desde las zonas más alejadas, donde los puntos de entrada de aire siguen abiertos. De esta manera se impide que el humo se extienda a lo largo del túnel, al confinarse en una zona determinada.

Se disponen conductos con rejillas a lo largo del túnel, conectados con estaciones de ventilación exterior. En cada tramo del túnel se disponen dos conductos conectados a dos ventiladores; uno de ellos impulsa aire por la parte inferior del tubo, mientras que el otro lo extrae por la parte superior.

Se recomienda para túneles de circulación bidireccional largos o unidireccional con posibilidad de congestión, muy largos o con configuración complicada por múltiples enlaces. Es el sistema de ventilación mecánica más seguro.

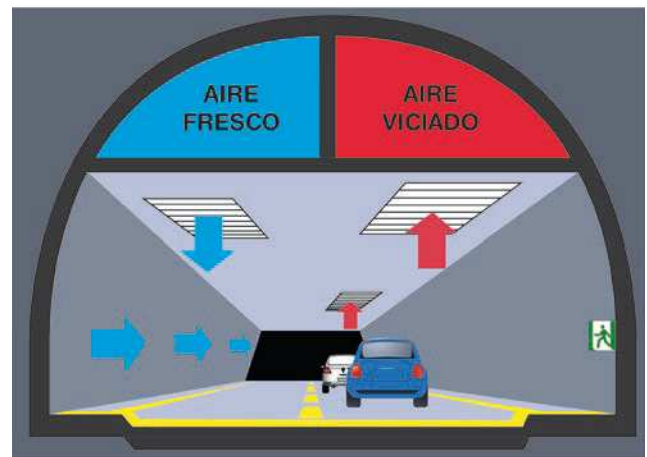


Imagen 5. Ventilación transversal

Tabla 5. Ventajas e inconvenientes de la ventilación semitransversal y transversal

Ventajas	Inconvenientes
Permanentemente se pueden obtener unas condiciones ambientales (tanto en caso de incendio, como por gases contaminantes)	Encarecimiento por conductos, dificultad de puesta en marcha, elevado gasto energético, dificultad de establecer redundancias y márgenes de seguridad en el sistema.

c) **Flujo de aire**

La distribución del humo en el interior del túnel depende del flujo de aire. Los flujos de aire se pueden dividir en tres grupos, en función de su efecto sobre la distribución de humo:

- Velocidades bajas de aire (<1 m/s) representada en la Figura 6. El humo normalmente está claramente estratificado cerca del fuego. Como generalmente las paredes del túnel enfrían el humo, la capa cae hacia abajo y la sección transversal completa se puede llenar de humo

- Velocidades de aire moderadas (1-3 m/s) representada en la Figura 7.
- Altas velocidades de aire (> 3 m/s) representada en la Figura 8.

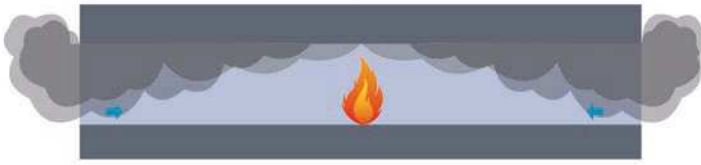


Imagen 6. Progresión del humo en un túnel con un flujo de aire menor de 1 m/s



Imagen 7. Progresión del humo en un túnel con un flujo de aire aproximado de 1-3 m/s



Imagen 8. Progresión del humo en un túnel con un flujo de aire mayor de 3 m/s

3. CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DE LOS INCENDIOS EN TÚNELES

3.1. LA TEMPERATURA DE LOS GASES DE INCENDIO

La temperatura influye de forma directa en la distancia que el equipo de intervención puede recorrer y el tiempo que puede durar la operación.

En el 2003 se realizaron unas pruebas en el túnel Runehamar (*Lönnermark e Ingason, 2005*). Entre los resultados que se obtuvieron respecto a la temperatura destacan:



Imagen 9. Incendio de un coche en túnel

- La temperatura por encima de la columna convectiva puede llegar a más de 1000 °C durante los diez minutos que siguen a la ignición.
- Durante las pruebas realizadas, las tasas máximas de liberación de calor fueron 202, 157, 119 y 66 MW, respectivamente.
- Diez minutos después de la ignición, en la zona de aguas abajo, todas las temperaturas del colchón de gases estaban por encima de 200°C hasta una distancia de 200 metros del fuego.
- En tan sólo quince minutos, las temperaturas alcanzaron su máximo en las siguientes distancias al punto central del fuego:
 - A 70 metros: 153 °C aguas arriba y 785 °C aguas abajo.
 - A 100 metros: 95 °C aguas arriba y 570 °C aguas abajo.
- Después de 50 minutos las temperaturas no bajaron de los 100 °C

En estas condiciones (temperatura y tasas máximas de liberación) no es posible que un equipo de bomberos llegue hasta el fuego (aguas abajo). Adicionalmente, existen altas posibilidades de que queden atrapados y/o sufran daños.



A partir de los resultados de varios estudios se ha determinado que en torno a los 100°C [23] se encuentra la temperatura de los gases que podría soportar un equipo de bomberos.

3.2. EL NIVEL DE RADIACIÓN GENERADO EN UN INCENDIO

Los niveles de radiación emitidos dentro de un túnel están determinados por la superficie afectada en combinación con la temperatura. Las llamas siempre tienen una temperatura más alta que el humo y por esta razón son la fuente de radiación más importante. Sin embargo tienen un efecto local (alrededor del foco), mientras que la capa de humo puede afectar a zonas muy alejadas del foco. En un incendio de gran tamaño (con una gran superficie de llamas y una capa de humo caliente) existe un riesgo importante de que el incendio se propague a otros vehículos. La radiación de las llamas puede ser tan fuerte que el incendio puede extenderse a vehículos próximos al foco, y existe la posibilidad de que la capa de humo propague el incendio a vehículos que están a gran distancia (> 100 metros) del foco.

Las pruebas que se realizaron en el túnel de Runehamar en 2003 han proporcionado información muy útil sobre la exposición a la radiación en la zona de aguas arriba. Durante las pruebas se midió la radiación a diferentes distancias del punto origen del incendio, en la zona de aguas arriba.

Tabla 6. Nivel de radiación (kW/m²) en la zona de aguas arriba durante las diferentes pruebas realizadas (Lönnermark e Ingason, 2005)

Nº de ejercicio	5 metros	10 metros	20 metros
1	80	14	2
2	35	18	3
3	20	9	2
4	40	10	4 (a 15 metros)

Se obtuvieron los siguientes resultados:

- En todas las pruebas realizadas (durante los siete minutos siguientes a la ignición), los niveles de radiación en la zona de aguas arriba (a una distancia de diez metros del origen del incendio) sobrepasan los 5 kW/m²
- Estos valores de radiación indican que, en ese momento, los bomberos podrían llegar a la escena hasta diez metros del fuego. A esta distancia es posible realizar un ataque directo al fuego mediante un chorro de agua. Por este motivo deben hacer llegar el agua hasta este lugar con gran rapidez para controlar el tamaño del incendio
- Si el tiempo de intervención fuese superior a siete minutos, los bomberos serían capaces de acercarse hasta una distancia de veinte metros del fuego. El ataque lo tendrían que realizar con agua pulverizada que, aunque podría no apagar el fuego, disminuiría el nivel de radiación y la temperatura del incendio. Todo esto tendría consecuencias positivas, porque permitiría a los bomberos avanzar para sofocar el fuego.
- Se espera que los valores de radiación en la zona de aguas abajo sean más altos que en los de las aguas arriba. Por este motivo será más difícil que el equipo de bomberos pueda acercarse al fuego desde la zona de aguas abajo.



Los resultados de algunos estudios determinan que el nivel aceptable de radiación para un equipo de bomberos estaría fijado en 5 kW / m².

Al determinar la táctica a llevar a cabo en presencia de radiación es necesario tener en cuenta otros factores, como pueden ser: factores de de composición (*backlayering*), el nivel de temperatura, la propagación del fuego y el suministro de agua.

3.3. TAMAÑO DE FUEGO O LA TASA DE LIBERACIÓN EN PICO DE CALOR

Es importante conocer el tamaño máximo de fuego que puede ser controlado por un equipo de bomberos. Desafortunadamente, hay poca información sobre este tema. Además, se trata de un parámetro complejo sobre el que se deben tomar en cuenta otros factores, como:

- el tipo de vehículo
- la carga
- la ventilación
- la altura del túnel
- el acceso al agua
- el equipo de extinción de incendios personal

Para estimar este parámetro se han seguido dos métodos de estudio. El primero de ellos, de carácter cualitativo, consiste en analizar los informes de incidentes y testimonios de los cuerpos de los equipos de bomberos. El segundo, de corte cuantitativo, permite obtener el límite de respuesta aceptable para un equipo de bomberos promedio, a través de la utilización de una ecuación que muestra la relación entre la tasa de liberación de calor (HRR), la distancia de la fuente de fuego y el nivel de radiación. Por este motivo la HRR se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$qs'' = \frac{1}{3} \frac{Q}{4\pi R^2}$$

Donde:

qs '' es el nivel de radiación

Q es la tasa total de emisiones de calor

R es la distancia desde la fuente puntual efectiva al lugar donde se encuentran los bomberos

Cuando se supone que el nivel de radiación para los bomberos con la ropa de protección es de 5 Kw / m² y la distancia de ataque óptimo es de 10 metros y el HRR es de aproximadamente 20 MW.

A partir de la información obtenida, tanto a través del análisis de los informes como del empleo de la ecuación, se ha llegado a la conclusión de que un bombero puede afrontar un siniestro que le ofrezca una HRR de entre 20 y 30 MW. Este rango de HRR corresponde a un incendio que afecta simultáneamente a un máximo de dos turismos, un autobús y un coche en llamas, o bien a un camión articulado tipo

Tabla 7. Resumen de los datos de tasa de liberación en el estudio de diferentes tipos de vehículos (Lönnermark e Ingason, 2005)

Tipo de vehículo	Nº de ejercicio	Energía (GJ)	Pico HRR (MW)	Promedio HRR (MW)	Tiempo hasta el pico (min)
1 Turismo	15	2-ago	1,5-8,5	4,1	oct-38
2 Vehículos	7	5-oct	5,6 - 10	7,6	13-55
3 Vehículos	1	NA	8,9	8,9	33
Autocar	2	41	29-30	29,5	7-ago
Camión articulado tipo HGV	10	10-244	13-202		ago-18

HGV donde el inicio de incendio se localiza en el vehículo y no se extiende a los bienes del remolque (cualesquiera que fueran) en una etapa temprana del fuego.

- La información relacionada con el contenido energético sólo estaba disponible para uno de los ejercicios realizados a los autobuses; el valor de 41 GJ se corresponde con el del autobús que proporciona un pico de HRR de 29 MW
- Las configuraciones de la prueba fueron muy diferentes para obtener un promedio que fuese de interés

3.4. PROPAGACIÓN DEL FUEGO

Extinguir el fuego antes de que se propague a los vehículos cercanos es prioritario para combatir con éxito dicho fuego originado en un túnel. Un aumento en el número de vehículos que participan en el incendio traerá consigo un aumento tanto en la velocidad de liberación del calor como en la temperatura, y también se producirá un mayor volumen de humo y de gases tóxicos. Esto genera una situación que es difícil de controlar y en la que los daños humanos y materiales pueden ser importantes.



Imagen 10. Llama de fuego propagándose

La propagación del fuego y los parámetros relacionados (la tasa de liberación, las temperaturas de los gases de incendio, la distancia entre vehículos, la longitud de la llama, las condiciones de ventilación) fueron estudiados en la prueba de túnel Runehamar en 2003 y se obtuvieron, entre otros, los siguientes resultados:

Tabla 8. Resultados obtenidos respecto a la propagación del fuego (Lönnemark e Ingason, 2005)

Número de ejercicio	Distancia	Tasa de liberación	Propagación del fuego (minutos)
1	95 m	202 MW	6
2	84 m	157 MW	03,03 a 03,04
3	66 m	119 MW	4,5

Todos estos datos indican que la propagación puede llevarse a cabo en un tiempo muy corto después del inicio del fuego. Por este motivo es necesario que los equipos de bomberos reciban el entrenamiento necesario y trabajen con las hipótesis que les permitan plantear las tácticas para bloquear el fuego antes de que se propague.

3.5. EL COMPORTAMIENTO DE LAS PERSONAS QUE SE ENCUENTRA DENTRO DEL TÚNEL INCENDIADO

El conocimiento del comportamiento humano durante un incendio en un túnel puede ayudar a establecer planes de evacuación y de rescate efectivos. Desafortunadamente, los estudios de la conducta humana en los incendios en túneles no se han realizado con el mismo detalle que en los de incendios de edificios. Probablemente se deba a que los incidentes en estos son menos comunes.

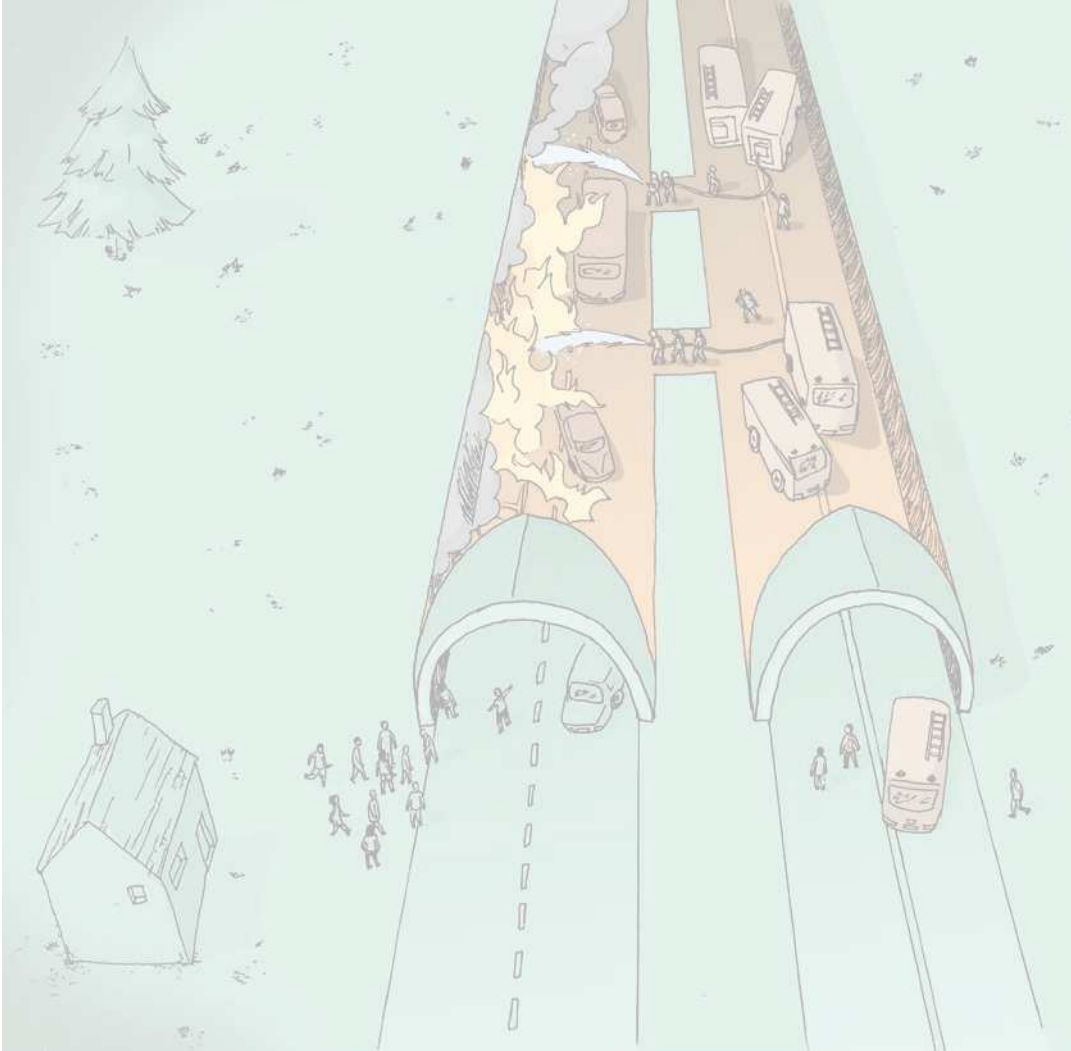
Entre los principales patrones de comportamiento que se pueden encontrar destacan:

- Los ocupantes suelen quedarse dentro del coche hasta contar con más información, o bien a la espera de que en algún momento el tráfico comience a moverse. En el incendio del túnel Mont Blanc (1999) se encontraron víctimas sentadas con el cinturón de seguridad puesto.



Imagen 11. Salida de emergencia

- Las personas, durante la evacuación, antes que utilizar las salidas de emergencia prefieren moverse a lo largo del túnel para alcanzar la entrada
- Las posibilidades de supervivencia dependen de varios factores entre los que destacan la magnitud del incendio y la concentración de gases tóxicos. Por ello las personas que permanecen atrapadas dentro del túnel podrían seguir vivas incluso después de un largo periodo de tiempo. Tal fue el caso de cuatro personas que permanecieron durante más de una hora dentro del túnel Seljestad (Noruega) y lograron sobrevivir.



CAPÍTULO

2

Técnicas de intervención

1. DESPLIEGUE DE TENDIDOS PARA EXTINCIÓN

En un incendio provocado en un túnel (por la avería de un coche, choque entre vehículos, corto circuito, etc.), frecuentemente se necesita un despliegue de mangueras (van en seco hasta zonas cercanas al incendio) que tengan un diámetro de 45 mm y que cuenten con un caudal de agua adecuado para las características del incendio (superficie, potencia generada, etc.). A continuación se detalla el caudal necesario para combatir el fuego de un incendio.

Tabla 9. Caudal necesario en función de las características del incendio (Ingasson 2001 y Sipp 2002)

Tipo de vehículo	Superficie de incendio (m ²)	Potencia generada (mw)	Caudal necesario (lt / min)	Número de líneas (360 l/m)
TURISMO	10	2,5-5	226	1
FURGONETA	35	15	462	2
CAMIÓN	200	100	1250	4

Dentro de un túnel, los tendidos se pueden desplegar de la siguiente forma:

- Plegado en doble, despliegue en exterior del túnel.
- Plegado en abanico más plegado de ataque en Cleveland.
- Tendidos con carros portamangueras de 45 mm.

Se recomienda que en la manguera anterior a la de ataque se coloque una reducción de 45 mm más bifurcación 70-45 mm. Esto permite tener una segunda línea de ataque, una progresión desde este punto en caso de no haber calculado el tendido correctamente y una línea de auxilio hasta que se acondicione una específica con ese propósito.

Para poder llevar a cabo un ataque dimensionado y efectivo en un incendio en un túnel, hay que tener en cuenta una serie de aspectos o variables tales como la efectividad en la aplicación del agua, la distancia óptima de ataque y los equipos de respiración autónoma.

1.1. EFECTIVIDAD DE LA APLICACIÓN DE AGUA

Para sofocar un incendio en un túnel se suelen emplear técnicas basadas en el **enfriamiento del colchón de gases**. En la utilización de estas técnicas es fundamental determinar **la efectividad de la aplicación del agua**, teniendo en cuenta para ello el porcentaje de evaporación de la misma. En este sentido, el agua que no llega a evaporarse como máximo podrá absorber la energía correspondiente al aumento de temperatura producida en el lugar del incendio. Por otra parte, el agua que se convierte en vapor y que, por tanto, llega a la temperatura de equilibrio del recinto, cuenta con una absorción de energía de hasta siete veces mayor a dicha temperatura.

Ver apartado incendios de interior para consultar ejemplo.

Para conseguir una aplicación efectiva de las técnicas de **enfriamiento del colchón de gases** se debe conseguir que las gotas de agua actúen sobre el mismo y no sobre las superficies del recinto en el que se produce el incendio. La evaporación del agua se debe producir mientras las gotas están en el aire, por lo que se debe evitar que entren en contacto con cualquier superficie.



El porcentaje de evaporación asociado a la efectividad en la aplicación de este tipo de técnicas debe oscilar entre un 50% y un 70%.

El tamaño de la gota es otro aspecto que resulta de gran importancia para sofocar el incendio. En la siguiente tabla se presentan las características en función de su tamaño:

Tabla 10. Características de las gotas en función de su tamaño

Tamaño de gota	Ventajas	Inconvenientes
Reducido	Mayor tiempo en suspensión y una mejor absorción de energía	El alcance es menor
Grande	Mayor alcance	Tienden a caer al suelo más rápidamente y el intercambio de calor no es tan efectivo
Óptimo (entre 0,3 mm y 0,7mm)	Alcanzan el equilibrio óptimo entre alcance y capacidad de absorción de la energía	

Ver apartado de incendios de interior para consultar en detalle este tema.

Por lo general dentro del túnel la distribución de la temperatura generada por el incendio no suele ser homogénea, menos aún si existe ventilación o se ha iniciado la aplicación de agua para el enfriamiento de los gases del mismo. Para realizar una aplicación efectiva y con ella reducir la temperatura, es necesario estudiar el **selector de caudal**, el ángulo de cono y el ángulo de aplicación con respecto al suelo. Posteriormente el bombero en punta de lanza aplicará la cantidad de agua necesaria para las zonas más calientes.

1.2. DISTANCIA ÓPTIMA DE ATAQUE

Para llevar a cabo una extinción efectiva es importante la distancia a la que deben situarse las diferentes líneas de manguera. En este sentido:

- Los vehículos pesados en un túnel de ventilación longitudinal requiere una distancia máxima de 10 metros
- Los coches requieren una distancia máxima de 5 metros

1.3. EQUIPOS DE RESPIRACIÓN AUTÓNOMA, CONTROL DEL AIRE

Debido a las características de un incendio en túneles suele existir incertidumbre en relación al tiempo de intervención. Por lo general este tipo de intervenciones tiende a superar los 40 minutos. Entre los aspectos que ocasionan esta incertidumbre se encuentran:

- La falta de información preliminar sobre los detalles del incendio y de las posibles estrategias de intervención que se pueden aplicar.
- La posible pérdida de orientación en un espacio lleno de humo.
- Situaciones imprevistas en la búsqueda y rescate de víctimas.

Estas condiciones pueden provocar situaciones de riesgo para los miembros de los equipos de emergencia, dado que podrían encontrarse con una reserva insuficiente de aire para salir del propio escenario del incendio. Para evitarlo, se han de seleccionar los equipos de respiración autónoma (ERA) adecuados a largas estancias en atmósferas no aptas para la respiración.

En la siguiente tabla se presenta la clasificación de estos equipos en función de sus características: (Tabla 11)



Ver el manual de equipos operativo para consultar en detalle la información sobre equipos ERA.



Imagen 12. Bombero con equipo de respiración autónoma



Los consumos y tiempos de autonomía varían en función del trabajo realizado, el nivel de estrés y las condiciones fisiológicas del usuario.

Al utilizar los equipos ERA se deben seguir las siguientes recomendaciones:

- En los trabajos realizados en la proximidad de las bocas de los túneles siempre se utilizarán ERA, ya que los gases y humos que salen al exterior a través de las mismas son de alta toxicidad
- En el acceso a través de galerías de evacuación, túneles no afectados y demás infraestructura subterránea susceptible de ser utilizada como vía de acceso a través de zona limpia, se utilizarán siempre ERA cuando no se tenga la certeza de que se trate de atmósferas respirables.

Tabla 11. Clasificación de los equipos ERA

Tipo de circuito y funcionamiento	Tipo de equipo	Duraciones calculadas para un consumo nominal de 40 litros	Cuándo utilizarlo
Circuito abierto: el aire se inhala directamente de las botellas de aire comprimido y se exhala al exterior	Monobotella	<ul style="list-style-type: none"> • Cuenta con una autonomía de 45 minutos. • Durante una intervención podría tener una duración real de entre 15 y 20 minutos 	En operaciones que no impliquen una larga estancia en el interior del túnel, es decir en trabajos en las bocas de acceso y aquellos que impliquen permanencias en el interior superiores a 20-30 minutos.
	Bibotella	<ul style="list-style-type: none"> • Cuenta con 90 minutos de autonomía. • En una intervención podría tener una duración real de entre 30 y 40 minutos. 	Para estancias en el interior de túneles que no exceden los 60 minutos. Tal sería el caso de intervenciones en túneles unidireccionales y bidireccionales con longitudes inferiores a 500 metros, o túneles bitubo de longitudes superiores a 500 metros, con zonas de acceso seguras al foco de incendio mediante galerías o túnel no afectado.
Circuito cerrado: están basados en el principio de la regeneración de oxígeno en el aire exhalado, durante un periodo de tiempo determinado, por lo cual durante el ciclo respiratorio no se expulsa el aire fuera del circuito.	Basado en el principio de peróxido potásico.	<ul style="list-style-type: none"> • Cuenta con 4 horas de autonomía. Mientras que para un consumo durante la intervención de unos 60 a 70 litros por minuto, la autonomía se reduce a unas 3 horas. 	En intervenciones de larga duración en túneles de gran longitud (superior a 4 km) o en aquellos túneles de longitudes superiores a 1 km que no tengan acceso seguro a través de galerías de evacuación, infraestructuras de acceso de equipos de emergencia, etc.
	De oxígeno enriquecido.		

2. RESCATE Y EVACUACIÓN DE VÍCTIMAS

Cuando se produce un incendio en un túnel una de las primeras medidas es evacuar a las personas atrapadas en su interior, ya que las condiciones ambientales en el interior del túnel pueden representar un riesgo para la vida humana.

El personal de los equipos de evacuación debe tener una respuesta automática, rápida y decidida, para dirigirla. Debe neutralizar las actitudes de bloqueo que se producen en este tipo de situaciones debido a que los usuarios del túnel:

- No están acostumbrados a desplazarse a través de ellos a pie, condición que se agrava debido a que la visibilidad en el interior del túnel es inferior a la visibilidad en el exterior
- No cuentan con formación acerca de la evacuación en túneles y, por lo general, desconocen la existencia del Plan de emergencias y sus salidas de emergencia, debido a que no suelen acceder a ellas en su tránsito habitual por el túnel

La evacuación en realidad deriva en una **autoevacuación**, debido a que es el propio usuario del túnel quien debe intentar ponerse a salvo. Por este motivo, un buen sistema de evacuación (buena señalización e iluminación de emergencia, unas salidas de emergencia adecuadas y unas galerías de evacuación bien ventiladas) será un factor determinante en su efectividad.



El umbral para el rescate de una persona está entre 2 y 2,5 kW /m² para una exposición de varios minutos. Contando con los trajes de protección y equipos ERA adecuados los equipos de rescate pueden soportar niveles de radiación de hasta 5 kW /m² con una exposición menor a 30 minutos.

Algunos parámetros muy relevantes a tener en cuenta al realizar una evacuación son los siguientes:

- Visibilidad
- Radiación

2.1. VISIBILIDAD

La visibilidad dentro de un túnel tiene una gran importancia para la evacuación y la intervención de los bomberos. En ambos casos afecta a la velocidad de desplazamiento y a la posibilidad de captar el entorno (salidas de emergencia, tomas de agua, señales de evacuación, etc.). Además, la visibilidad está directamente relacionada con la toxicidad: a menor visibilidad mayor toxicidad.

Aunque es el sistema de ventilación el que principalmente influye en la visibilidad, la cantidad de humo producido por el incendio aumenta con el tamaño del mismo. Por eso se puede concluir que a mayor tamaño del incendio, menos visibilidad dentro del túnel (en las zonas afectadas por el humo).

2.2. RADIACIÓN

En materia de evacuación sólo la capa de humo es la que tiene una influencia clara. Si está radiando con una intensidad elevada afectará a las personas que se están trasladando por debajo de la misma, y la radiación dificultará su evacuación. La radiación de las llamas y de la capa de humo también afectará a los equipos de emergencia y, si la radiación es muy fuerte alrededor del foco, será muy difícil acercarse para extinguir el incendio.

3. CONTROL DE LA VENTILACIÓN

El flujo de aire tiene diversos efectos sobre la evolución del incendio; el más importante es que el aire lleva oxígeno al foco (la cantidad dependerá del sistema de ventilación y de su regulación). Dependiendo de la cantidad de oxígeno que llega al incendio, este puede desarrollarse de diferentes maneras:



Imagen 13. Ventiladores en túnel

- Si hay un gran aporte de oxígeno, el incendio está condicionado por la cantidad de combustible (se quema violentamente hasta que se consume en su totalidad)
- Si no existe un gran aporte de oxígeno se producen muchos productos que no han sido quemados por el incendio, pero que tienen un efecto muy negativo sobre las condiciones aguas abajo del mismo.

La ventilación del túnel influye igualmente sobre el comportamiento del humo, ya que la velocidad del flujo del aire afecta a este de diferentes formas.

Es necesario entender las bases de la dinámica de fuego dentro de los túneles para poder prever posibles problemas y conocer las posibles condiciones que pueden afectar a una intervención de equipos de emergencia.

En un incendio dentro de un túnel el control de la ventilación es indispensable para controlarlo, extinguirlo y rescatar a las posibles víctimas. Este control se realiza conociendo el volumen del flujo de entrada y salida, la dirección y el camino de la ventilación dentro de la propia estructura. Algunos sistemas de ventilación pueden soplar todo el humo producido por el fuego a una de las dos bocas del túnel, para que sus ocupantes puedan escapar a un lugar seguro y los bomberos intervinientes tengan una situación más favorable que les permita acercarse y atacar el fuego.

En este tipo de incendios, la apertura de una salida de gases al exterior permitirá establecer un flujo de gases desde zonas de mayor presión (por encima del plano neutro) en el interior del recinto hacia el exterior que se encuentra a menor presión. La evacuación de gases conlleva la ventaja de liberar gases tóxicos y combustibles. Por otra parte se establecerá un flujo desde el exterior hacia las zonas de menor presión en el interior (por debajo del plano neutro), que hará que el aire fresco genere una atmósfera limpia que permita:

- Aumentar la visibilidad
- Reducir la temperatura en determinadas zonas
- Controlar la potencia del incendio
- Conducir el flujo de gases según la opción táctica más recomendable en cada momento

3.1. MOVIMIENTO DE LOS GASES DE INCENDIO

En toda operación de extinción interactúan los gases del incendio, el aire fresco y el vapor de agua. Todos ellos son fluidos cuya dinámica está explicada tanto por el efecto flotabilidad como por las diferencias de presión que tiene lugar en el interior y el exterior del túnel (ver el apartado de incendios de interior para ampliar información sobre el efecto flotabilidad y las diferencias de presión).

Un túnel cuenta con aperturas de ventilación al exterior, por lo que se produce un movimiento de gases que abarca la alimentación de aire al incendio y los gases que éste produce. Se denomina flujo de gases, y en él se puede identificar una ruta de gases fría (que va desde la entrada de ventilación hasta el foco del incendio) y una ruta de gases caliente (constituida por los gases de incendio en busca de la salida).

Cada una de estas rutas cuenta con unas características que se plasman a continuación:

Tabla 12. Comparativa de las características de las rutas que constituyen el flujo de gases

	Ruta fría	Ruta caliente
Visibilidad	Buena	Baja
Temperatura	Baja	Alta
Gases presentes en la atmósfera	Alta concentración de oxígeno (aumento de potencia en incendio limitado por la ventilación)	Alta concentración de gases tóxicos y gases potencialmente inflamables
Condiciones de supervivencia	Buenas	Críticas

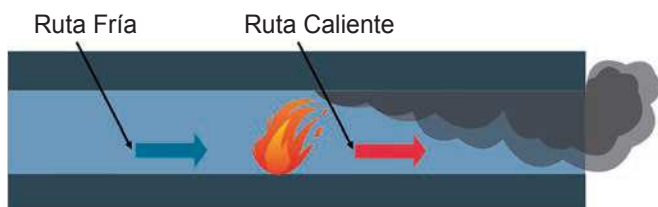


Imagen 14. Flujo de gases unidireccional generado por el incendio

En un incendio dentro de un túnel no se recomienda optar por un único modo de ventilación. El tipo de táctica de ventilación a utilizar dependerá del tipo de fuego:

- Un **mínimo flujo de ventilación**, lo suficientemente alto como para mantener la estratificación alrededor de 1m/seg, se debe utilizar para los incendios que implican a un vehículo pesado (GMC mayor de 3500 kg, también conocido como HGV) o un gran derrame de combustible.
- Un **mayor flujo de ventilación** debe ser utilizado para fuegos en los que esté implicado un turismo o un incendio de pequeñas dimensiones, y la velocidad será máximo entre 1 y 3 m/seg.

Una vez que el fuego se haya extinguido se recomienda controlar el flujo de ventilación en función de las necesidades del cuerpo de bomberos.

3.2. PRINCIPIOS DEL ATAQUE EN PRESIÓN POSITIVA APLICADA A TÚNELES

3.2.1. FLUJOS UNIDIRECCIONALES

En los incendios en túneles se produce un flujo unidireccional debido a que existen al menos dos aperturas; una de ellas de entrada y otra de salida. Estos flujos son típicos en incendios ventilados de forma natural, en los que la alimentación y salida de gases se realiza a distintos niveles y media una diferencia de altura que contribuye a favorecer la diferencia de presión.

En incendios en túneles se puede hacer uso de **técnicas de ventilación en presión positiva (VPP)**, que se valen de la correcta aplicación de ventiladores para eliminar el humo en las diferentes zonas del túnel. Debido al efecto del ventilador se genera una masa de aire en movimiento que penetra y presuriza el interior del túnel y establece un flujo de gases unidireccional, que o bien desplaza o bien extrae los gases del incendio al exterior. Ello genera que la visibilidad dentro del túnel mejore y se reduzca la temperatura y el nivel de radiación (en caso de existir). En definitiva, estas técnicas facilitan las operaciones del equipo de intervención en el túnel: control y extinción del incendio, el rescate y la evacuación de las víctimas.

Sin embargo es importante tener en cuenta que el aporte de aire fresco generará un aumento en la potencia del incendio, que dependerá de la efectividad con la que se realice el barrido de gases y el nivel de turbulencias. En este sentido es muy importante que la ventilación se coordine con las labores de extinción mediante la aplicación de agua.

Ver apartado de incendios de interior para consultar en detalle las técnicas de ventilación en presión positiva.



Imagen 15. Desplazamiento de gases dentro del túnel con ventilador



El volumen de aire que podemos desplazar con ventiladores portátiles es muy limitado. Como norma hay que usarlo en la misma dirección del movimiento natural de los gases para limitar el efecto back-layering, y siempre sin superar la velocidad crítica para no aumentar en exceso el heat release rate (HRR) del incendio.

La velocidad de desplazamiento de los gases se debe situar entre 1 y 3 m/s. Velocidades por debajo de 1 m/s hacen que la capa de gases baje a nivel de suelo rápidamente, y velocidades por encima de 3 m/s rompen la estratificación, además de aportar un elevado volumen de aire que hace que aumente la potencia de incendio.

En función de lo anterior se pueden estudiar y aplicar las técnicas de ventilación (VPP ofensiva, VPP defensiva, etc.), reseñadas en el apartado de incendios de interior y ventilación, que más convengan en cada momento.

4. ORIENTACIÓN Y PROGRESIÓN EN TÚNELES

Para llevar a cabo la orientación en túneles existen diferentes técnicas a las que se puede recurrir. Entre ellas destacan:

- la orientación y progresión con tendido de manguera
- el rastreo con cuerda o elemento guía
- la orientación sin elemento guía
- la orientación con cámara térmica
- una combinación de algunas de ellas

Entre las principales dificultades que se encuentran en este tipo de maniobras y que podrían derivar en situaciones de ansiedad durante la intervención destacan tanto el esfuerzo que se realiza al recorrer grandes distancias en ambientes en los que se pueden registrar altas temperaturas, radiación, falta de visibilidad, etc., como la falta de control sobre diferentes aspectos relacionados con el incendio dentro del túnel, por ejemplo la falta de control de los tiempos de trabajo de los equipos de respiración autónoma.

4.1. ORIENTACIÓN SIN ELEMENTO GUÍA

Es un tipo de orientación que sólo se debe utilizar si no existe posibilidad de ejecutar alguna otra técnica que ofrezca más garantías de seguridad para los intervinientes. Su uso queda reducido a situaciones en las que es urgente realizar el rescate, o no se cuenta con otros medios (longitudes suficientes de cuerda guía, mangaje, etc.) para poder emplear otra técnica de orientación con éxito.

Al utilizarla durante la progresión se deben considerar las siguientes precauciones:

- Es necesario mantener la orientación en todo momento. Es decir, se debe saber dónde se está y por dónde se ha pasado
- Se comienza por uno de los laterales del tubo del túnel y nunca se abandona.



Imagen 16. Orientación sin elemento guía

- Se avanza hasta alcanzar el objetivo.
- En caso de realizar un rastreo en una zona auxiliar se hace de la misma manera, nunca se cambia de pared.
- Siempre se tiene que saber el lugar en el que se encuentra la salida del túnel.

En relación con lo anterior, conviene decir que las aceras de los túneles frecuentemente se cubren con dos tipos de baldosa, de forma que cada lateral del túnel tiene una diferente rugosidad en el suelo que lo identifica de forma unívoca y, en condiciones de nula o baja visibilidad, se puede utilizar como referencia para evacuar siempre hacia el mismo sentido.

Debido a que las situaciones de desorientación están muy ligadas al estrés de la intervención es necesario contar con pautas concretas de actuación para mantener la calma y llevar a cabo las acciones necesarias para salir del túnel. En este sentido el entrenamiento para enfrentar con éxito este tipo de situaciones es primordial.

4.2. RASTREO CON CUERDA O ELEMENTO GUÍA

El rastreo con cuerda guía está más indicado para la búsqueda de víctimas que para la progresión. En ocasiones también se pueda utilizar para brindar una seguridad adicional durante el desarrollo de la intervención. Los elementos guía tienen especial utilidad para rastrear zonas auxiliares del túnel donde pudieran haberse refugiado víctimas (por ejemplo vías de evacuación, nichos, cuartos auxiliares, etc.)



Imagen 17. Orientación con cuerda como elemento guía

Como elemento guía, podemos encontrar que algunos túneles cuentan con la **línea Ariadna**. Se trata de un cable guía que se encuentra a lo largo del tubo del túnel y al que debemos ir unidos. En el caso de existir, la empresa concesionaria del túnel deberá facilitar el punto de unión y, si esto no es posible, se utilizará un cabo de anclaje. Este elemento no se encuentra dentro de las zonas auxiliares.

4.3. ORIENTACIÓN Y PROGRESIÓN CON TENDIDO DE MANGUERA

Se trata de una técnica bastante sencilla, ya que el recorrido por el túnel se produce de forma intuitiva y desde una posición de cierta seguridad. Se avanza con un elemento de ataque y/o protección frente al fuego que, además, puede utilizarse como elemento guía.



Imagen 18. Orientación y progresión con tendido de manguera

En su aplicación se deben considerar las siguientes precauciones:

- Mantener en todo momento la referencia del lateral del túnel por el que se avanza.
- Conseguir la máxima exactitud en el cálculo de la distancia a recorrer (porque se necesitará que la manguera cuente con una longitud para toda esa distancia, incluso algo más).
- Elegir el diámetro de tendido adecuado para cada tipo de extinción.
- Avanzar de forma cuidadosa para sortear los obstáculos que se encuentran al realizar la progresión (por ejemplo, vías de evacuación laterales) y que pueden dificultar la progresión del tendido de la manguera. Una vez que se consigue rodear el obstáculo es necesario volver a la referencia del lateral inicial.
- Si nos encontramos con vías de evacuación laterales, estas deben rastrearse con cuidado para no introducir en ellas gases del tubo del túnel. Debido a que entrar con el propio tendido puede causar problemas de movilidad y estrés (se entra en una zona más angosta y la vuelta al tubo puede ser dificultosa), es necesario dejarlo en el tubo y realizar el rastreo con una cuerda guía o auxiliar en busca de víctimas.



El rastreo para la localización de víctimas dentro del túnel con el único apoyo de una manguera es lento y complicado, es recomendable apoyarse en otro tipo de técnicas para realizarlo de forma más efectiva. La combinación de técnicas es una herramienta muy valiosa para actuar con efectividad en este tipo de situaciones.

4.4. ORIENTACIÓN CON CÁMARA TÉRMICA

La orientación con cámara térmica no sustituye a las técnicas de orientación tradicional antes expuestas. Se trata de un elemento adicional que permite mejorar la efectividad de:

- La toma de decisiones.
- La búsqueda y el rescate de víctimas.
- La evaluación del escenario.
- La localización del foco del incendio.
- La estimación de la extensión del incendio.
- La localización de los puntos calientes.
- La identificación de potenciales *flashover*.
- La determinación de puntos de ventilación.
- La determinación de puntos de entrada y salida.
- Las tareas de revisión.



Imagen 19. Orientación con cámara térmica

Dado que el tubo no cuenta con espacios ocultos la cámara térmica otorga una visión nítida dentro del túnel y la salida se puede ver en todo momento, con lo que la búsqueda de víctimas resulta relativamente sencilla.

Aunque su uso proporciona una gran sensación de seguridad, en caso de fallar puede producir desorientación y provocar el efecto contrario. Específicamente, al utilizar la cámara térmica hay que tener presente la problemática que se genera en entornos en los que se está produciendo el efecto **spalling en el hormigón**. La producción de vapor, fruto de un cambio del estado del agua intersticial del hormigón a temperaturas comprendidas entre los 100 -150°C, tiene un efecto perjudicial en la visibilidad que se consigue a través de la cámara térmica, dando la sensación de que ha dejado de funcionar. En estos casos, lo habitual es que, pasado un tiempo, la cámara térmica

vuelva a su funcionamiento normal, por lo que cobra vital importancia mantener la calma durante ese lapso.



Imagen 20. Spalling

4.5. COMBINACIÓN DE TÉCNICAS DE ORIENTACIÓN Y PROGRESIÓN

Ante una situación cambiante y que debe adaptarse a distintos túneles, intervenciones y disponibilidades de material como la que nos ocupa, no es aconsejable ceñirse

al uso de una única técnica. En realidad, la mejor herramienta disponible es, precisamente, la combinación de técnicas.

- Disponer de la **cámara térmica** resulta fundamental. Es conveniente que el equipo de intervención esté formado por tres personas que progresen dentro del túnel: dos progresarán de manera tradicional, con tendido por el lateral del túnel, y otro portará la cámara térmica para localizar los focos, las entradas, las salidas, las víctimas, los posibles obstáculos, los movimientos de los gases, etc.
- El **tendido** es adecuado como línea de salida por el tubo. Se puede combinar con una cuerda en zonas anexas para rastrear el tubo entre varios bomberos unidos entre los dos laterales (rastreos en abanico).
- Otra posibilidad sería combinar la ventilación con las técnicas que se han estudiado de orientación y progresión en túneles. Aunque la ventilación en el tubo es difícil y es posible que quede una cierta cantidad de gases que limiten la visión a las distancias, permite cierta visión a corta distancia que hace ganar seguridad a víctimas e intervinientes. Esto logra aumentar la velocidad en la ejecución de las tareas y, con ello, la eficacia de las labores a realizar.

