



## CAPÍTULO 16. VENTILACIÓN



---

DIRECCIÓN GENERAL DE  
SERVICIOS TÉCNICOS

## CAPÍTULO 16. VENTILACIÓN



Túnel El Sinaloense, Carretera Durango-Mazatlán

### 16.1. GENERALIDADES

La necesidad de mantener durante la operación de los túneles carreteros, una atmosfera respirable, no tóxica y, en condiciones ambientales óptimas; obliga a renovar el aire mediante sistemas de ventilación para impedir que los gases y humos generados por los vehículos de motor, alcancen concentraciones límite predeterminadas que pongan en riesgo la salud de los usuarios.

El estudio de la ventilación en un túnel de carretera tiene la finalidad de reducir a límites aceptables, la concentración de gases tóxicos y humos expulsados por los vehículos que circulen en el interior del túnel, teniendo en cuenta los parámetros de óxidos de carbono y los humos provenientes de los motores de los vehículos que afectan a la visibilidad dentro del túnel.

La cantidad y composición de humos varían sensiblemente en función de diversos parámetros que a continuación se describen y que deben ser tomados en cuenta al momento de diseñar un túnel:

- Pendiente (en el túnel y en los accesos).
- Altura o nivel sobre el mar.
- Composición del tráfico.
- Fluidez del tráfico.
- Si es unidireccional o bidireccional.

Las condiciones del túnel, del tráfico y su longitud serán las que determinen el sistema de ventilación artificial más adecuado para cada caso, siendo conveniente dotarlo del correspondiente sistema de control. Otros criterios para la elección del sistema son el entorno y/o afección del medio ambiente y el costo de la instalación y operación del sistema.

## 16.2. ALCANCE DE LA VENTILACIÓN NATURAL

La longitud máxima de túnel sin ventilación artificial depende de la intensidad del tráfico, pero también de causas climáticas del lugar e incluso geográficas. El análisis de estas últimas es bastante complicado, por lo que hoy en día existen reglas en relación con el alcance de la ventilación natural en los túneles de carretera con longitud mayor o igual a 400 metros.

La P.I.A.R.C (Asociación Internacional Permanente de Congresos de Carretera), propone la siguiente regla, obtenida experiencias:

$$L = \frac{C}{M} \quad (16.1)$$

Donde:

$L$  = Longitud admisible en kilómetros de un túnel ventilado naturalmente.

$C$  = es una constante cuyo valor puede estimarse entre 250 y 400 metros para túneles bidireccionales y 400 para túneles unidireccionales.

$M$  = es la intensidad de tráfico de vehículos/hora que atraviesa el túnel.

## 16.3. DISEÑO DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN

Para el diseño del sistema de ventilación de un túnel se recomienda seguir un esquema como el siguiente:

- a) Estimar el alcance de la ventilación natural en cada caso. Se debe tomar en cuenta que la ventilación natural se ve favorecida por las siguientes circunstancias:
  - Si el eje del túnel coincide con la dirección de los vientos dominantes
  - Si los portales del túnel están situadas en zonas abiertas y expuestas al viento
  - Si el trazo en planta y perfil es en tangente
  - Si el revestimiento tiene una superficie inferior a la lisa
  - Si los portales del túnel están a distinta elevación
- b) Si la longitud es excesiva del túnel para el alcance estimado de la ventilación natural, será necesario diseñar un sistema de ventilación forzado. En primer lugar habrá de calcularse los caudales necesarios para la dilución del monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y humos. También se debe considerar el caso de incendio dentro del túnel.
- c) Conocido el caudal y la sección útil del túnel se puede calcular la velocidad del aire por el mismo. Si resulta inferior a 10 m/seg, se podrá utilizar la ventilación longitudinal. En caso contrario se podrá diseñar una ventilación transversal o pensar en pozos de ventilación intermedios. Siempre que sea posible es preferible acudir a la ventilación longitudinal, ya que es más económica que los otros tipos.
- d) Los ventiladores deberán ser capaces de proporcionar el caudal de aire requerido venciendo la resistencia aerodinámica del propio túnel, de sus singularidades y de los obstáculos en él situados. Para ello habrá que calcular aplicando la mecánica de fluidos, los siguientes términos de un sumatorio:

- Resistencia ofrecida por los parámetros del túnel a la circulación del aire
- Resistencia debida a las boquillas (ensanchamiento y estrechamientos)
- Presión de ventilación natural (puede disminuir o aumentar la resistencia de ventilación)
- Efecto pistón de los vehículos (puede aumentar o disminuir el empuje necesario de ventilación)
- Resistencia aerodinámica de los vehículos
- Resistencia debida al viento dominante (puede ser positiva o negativa).

Al sumar todos los términos se obtendrá el empuje que deberán suministrar los ventiladores para vencer la resistencia total del túnel manteniendo la velocidad del aire. Conocidas las características técnicas de los ventiladores debe elegirse el más adecuado para las condiciones de servicio establecidas.

El número de ventiladores está determinado por la siguiente fórmula:

$$N_v = \frac{E_t}{E_u \times \phi_i \times \phi_v} \quad (16.2)$$

Donde:

$E_t$  = empuje total a proporcionar por los ventiladores en  $N$

$E_u$  = empuje unitario por ventiladores en  $N$

$\phi_i$  = factor de instalación:

$$\phi_i = \left( \frac{A \times 2}{B} \times 0.04 \right) + 0.79 \quad (16.3)$$

Donde:

$A$  = distancia entre el eje del ventilador y la pared más próxima (m)

$B$  = es el diámetro nominal del ventilador (m)

Si  $A/B > 2$  entonces  $\phi_i = 0.96$

$\phi_v$  es el factor por relación de velocidades.

$$\phi_v = \frac{v_t}{v_y} \quad (16.4)$$

Donde:

$v_t$  = la velocidad del aire en el túnel en m/seg.

$v_y$  = la velocidad de soplado del ventilador en m/seg.

e) En las salidas del aire viciado, es conveniente adoptar una serie de precauciones para evitar molestias a los usuarios de la vía:

- Si la concentración de humos y gases es muy alta, conviene evacuar el aire mediante una chimenea o por un pozo intermedio.
- Si la salida de aire viciado es por propio túnel es conveniente efectuar unas plantaciones de árboles cerca de los portales para diluir los gases.

f) Una vez dimensionados los equipos de ventilación deben tomarse en cuenta las diferentes condiciones de servicio a las que van a estar sometidos. Lógicamente los caudales de aire limpio necesario dependerán de la intensidad del tráfico. Por lo tanto deben disponerse de elementos de medidas de gases y de aforo de tráfico que garanticen en tiempo real las condiciones ambientales indicando a los equipos de arranque qué ventiladores deberán estar en funcionamiento.

- Los medidores de aforo de vehículos obtienen información que permiten al centro de control enviar a los equipos, la señal de puesta en marcha de los ventiladores dependiendo del tráfico puntual.
- Estos equipos no son los más adecuados en el caso de tráfico congestionado, por lo que deberán colocarse adicionalmente detectores de monóxido de carbono con sensores electroquímicos. Estos detectores coordinarán la señal sobre la ventilación para impedir que se alcancen concentraciones tóxicas peligrosas.

## 16.4. SISTEMAS DE VENTILACIÓN

El sistema de ventilación es de enorme importancia en la operación de un túnel, y es determinante en caso de accidente. Los objetivos que se pretenden con la ventilación son:

- Mantener en todo momento una calidad de aire adecuada para que la toxicidad del ambiente dentro del túnel, no alcance límites prefijados.
- Garantizar que la visibilidad sea suficiente y segura para la conducción.
- En caso de emergencia, control de los humos reduciendo al máximo la gravedad de la incidencia.
- Permitir la protección de los propios usuarios.
- Mantener libre de humos los accesos a los servicios de seguridad y las zonas de evacuación.
- Permitir la extracción del humo tras la extinción.

Se emplean habitualmente cuatro sistemas distintos de ventilación, dependiendo de factores tales como la longitud, la intensidad de tráfico o sentido de éste. Los cuatro sistemas son: ventilación natural, longitudinal, semitransversal y transversal, aunque existen túneles con sistemas híbridos.

### 16.4.1. Ventilación natural

La ventilación natural consiste en dejar que sea la propia circulación natural del aire por el túnel la que se encargue de evacuar los humos que se producen en su interior.

En todo túnel se produce de manera natural una cierta circulación de aire en su interior, debido a la diferencia de presión existente entre ambos portales. Esta diferencia de presión puede estar ocasionada por una diferencia de temperaturas entre ambos extremos del túnel, por diferencia de elevación o por la dirección del viento.

La ventilación natural opera según la climatología del momento, y normalmente es suficiente para renovar el aire de un túnel cuando éste es muy corto o cuando la intensidad del tráfico que por él circula es muy pequeña.



Figura 16.1. Ventilación natural.

### 16.4.2. Ventilación Longitudinal

Es aquella en la que se fuerza la circulación natural del aire a lo largo del túnel. Por un de los portales entra aire fresco y por el otro portal contrario sale el aire viciado. El sentido de circulación del aire sería conveniente que coincida con el de la circulación de los vehículos cuando el túnel es unidireccional, con objeto de aprovechar el efecto pistón que producen éstos.

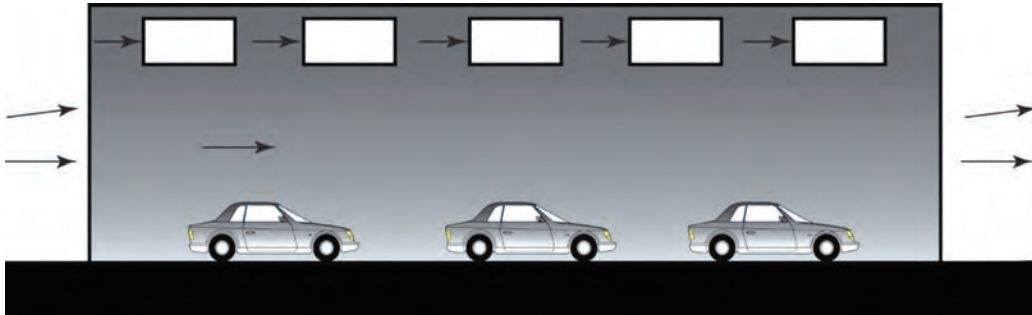


Figura 16.2 Ventilación longitudinal con ventiladores axiales.

La circulación del aire se logra mediante ventiladores de chorro (jet fans). Generalmente, los ventiladores se colocan en clave del túnel cada cierto intervalo, aunque existen otros sistemas en que los ventiladores sólo se colocan en el portal de entrada del túnel, o en los pozos de ventilación intermedios.

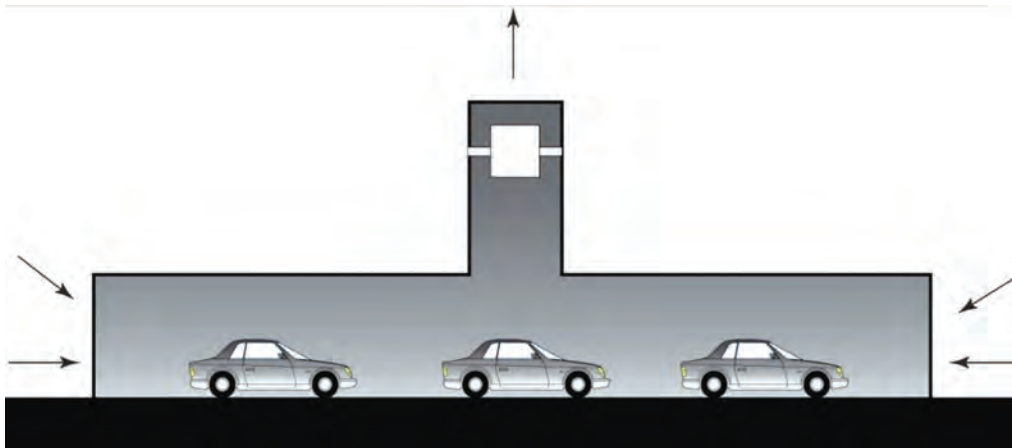


Figura 16.3. Ventilación longitudinal con pozo central.

Los ventiladores suelen ser reversibles, especialmente en el caso de túneles bidireccionales, para poder aprovechar la ventilación natural en el sentido en que ésta se produzca. También se incluyen sistemas de medición de humos y de contaminantes con objeto de aplicar únicamente la potencia de ventilación que sea necesaria.

### 16.4.3. 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 techo falso. Aproximadamente, cada 6 metros este conducto comunica con el interior del túnel mediante unos difusores, puntos por los que entra el aire fresco.

El aire viciado circula a lo largo del propio túnel y sale al exterior por los portales.



Este sistema es más costoso de instalación y funcionamiento que el longitudinal ya que necesita, además de los ventiladores, un techo falso y un conducto para el aire fresco. Por el contrario, permite longitudes de túnel e intensidades de tráfico superiores. Los ventiladores suelen ser reversibles, con objeto de poder extraer los humos del túnel en caso de incendio.

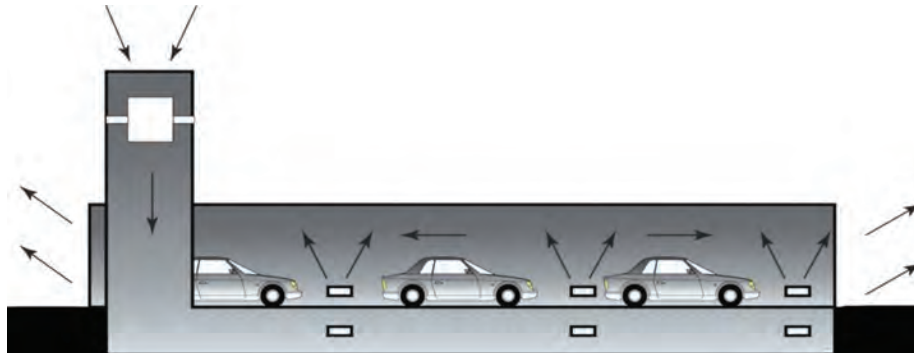


Figura 16.4. Ventilación semitransversal.

#### 16.4.4. Ventilación transversal

Es el sistema más complejo, más seguro y el que permite mayores longitudes de túnel y mayores intensidades de tráfico, pero resulta también más caro en instalación y mantenimiento.

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 techo falso y con un muro divisorio entre ambos.

Uniformemente, a lo largo de la longitud del túnel, se impulsa aire fresco a su interior y se aspira el aire viciado.

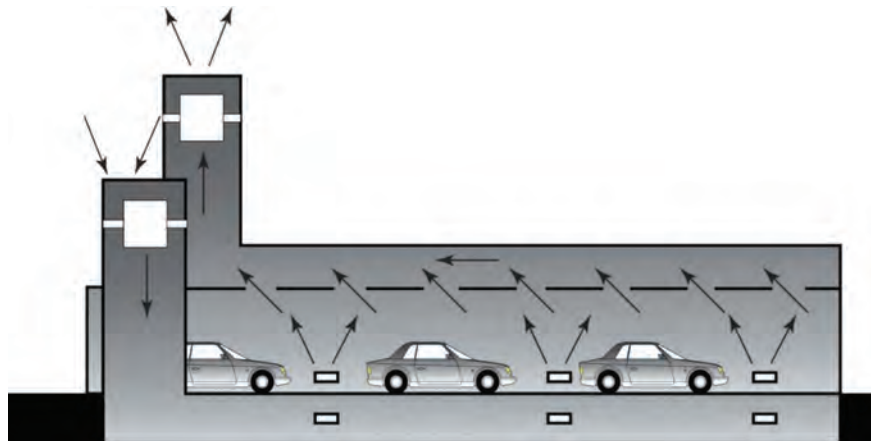


Figura 16.5. Ventilación transversal.

La ventilación transversal se utiliza en aquellos túneles que requieran un sistema de ventilación mecánica (mayores de 1,000 m) y estos sistemas deberán tener la capacidad de extraer el humo en caso de incendio.

En el sistema de ventilación transversal se emplean habitualmente ventiladores del tipo axial en los que el flujo proveniente de los conductos de ventilación pasa por el ventilador que lo acelera.

El punto de funcionamiento del ventilador dependerá de la instalación a la que se acople y según la curva característica del mismo. No obstante, de forma general, se puede aproximar la curva de funcionamiento por un polinomio de segundo grado.



### 16.4.5. Cuartos técnicos

Otros sitios que están habitualmente dispuestos en el interior del túnel son los cuartos técnicos para los transformadores de los sistemas eléctricos, que dan servicio a instalaciones tales como la iluminación, dispositivos de señalización, detectores de CO, humos, etc.

El calor generado por los transformadores se disipa mediante sistemas de ventilación independientes que operan de modo automático cuando la temperatura de estos recintos se incrementa.

## 16.5. SISTEMA DE VENTILACIÓN EN CASO DE INCENDIO

El objetivo del sistema de ventilación en caso de incendio, es mantener a los usuarios del túnel en la zona de aire fresco el mayor tiempo posible.

Según la definición de la Asociación Internacional Permanente de los Congresos de Carreteras (P.I.A.R.C.), el sistema de ventilación tiene los siguientes objetivos:

- Salvar vidas facilitando la evacuación de las personas.
- Facilitar la operación de rescate y extinción.
- Evitar el riesgo de explosiones.
- Limitar los daños a la estructura y equipamiento del túnel.

Hoy en día, las medidas de seguridad a seguir en caso de un incendio, son las que condiciona el diseño de los sistemas de ventilación de los túneles.

En este Manual se establece que todos los túneles de más de 400 metros deben ser diseñados con un sistema de ventilación, con su correspondiente sistema automático de control capaz de analizar el control de contaminantes en situación normal de tráfico y congestionado, así como el control de calor y humo en caso de incendio. Se establece el criterio para un incendio tipo de 30 MW y un caudal de humos de 120 m<sup>3</sup>/seg.

Los proyectos del sistema de ventilación deben incluir el cálculo de la capacidad mínima aceptable del sistema, en lo que respecta a la extracción y/o caudales, el proyecto de la red de ventilación y la elección de equipos de ventilación apropiados.

El comportamiento de un incendio en el interior de un túnel es de evolución rápida y de graves consecuencias, por las altas temperaturas, la gran cantidad de humos calientes y gases que se producen, constituyendo el control de estos humos uno de los elementos decisivos para la evacuación de los usuarios.

No obstante, para elegir la estrategia de ventilación deseada, de cómo actuar ante una situación de incendio, es necesaria una explicación del comportamiento de los humos producidos a consecuencia del mismo.

### 16.5.1. Comportamiento del humo en el interior de un túnel

En caso de producirse un incendio en un túnel la forma en que evoluciona la propagación de los gases, así como las temperaturas que se alcancen en la secciones más cercanas al foco, depende fundamentalmente de la velocidad de la corriente de aire en el interior del túnel.

Los humos que se generan en el incendio a alta temperatura y, debido a la flotabilidad de éstos alcanzarán la bóveda del túnel, se estratifican, el aire caliente sobre el aire frío, avanzando en la parte alta del túnel hacia cada lado a un velocidad de unos 2 m/seg, incluso sin ventilación y siendo el túnel horizontal. Cuando el humo caliente se aleja del foco comienza a enfriarse, y va ocupando toda la sección del túnel.

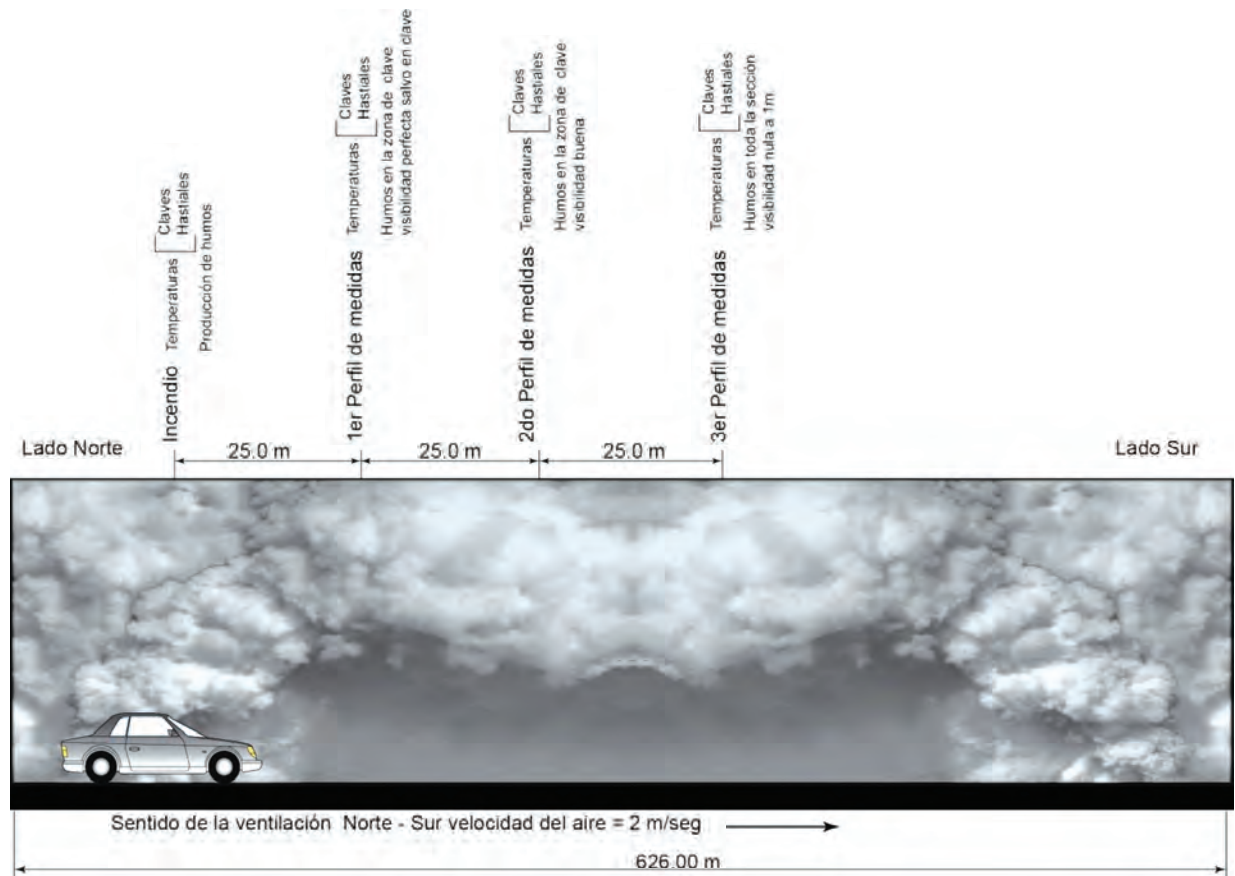


Figura 16.6. Evolución de humos.

El foco del incendio se alimenta por su parte inferior con corrientes de aire fresco re-entrantes. Según sean las condiciones de la corriente de aire longitudinal en el túnel, la distribución de los humos calientes se producirá, tanto hacia la zona de arriba del foco, como podrá producirse el retorno de esa capa caliente de humos hacia la zona de abajo.

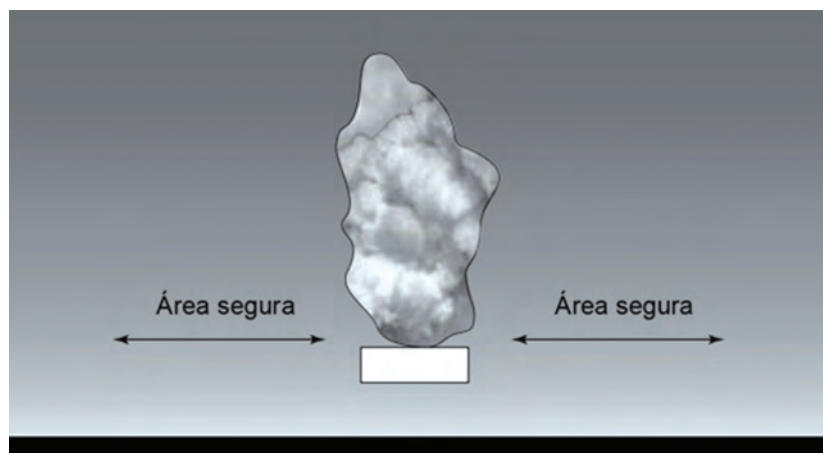


Figura 16.7. Fuego en estructura abierta.

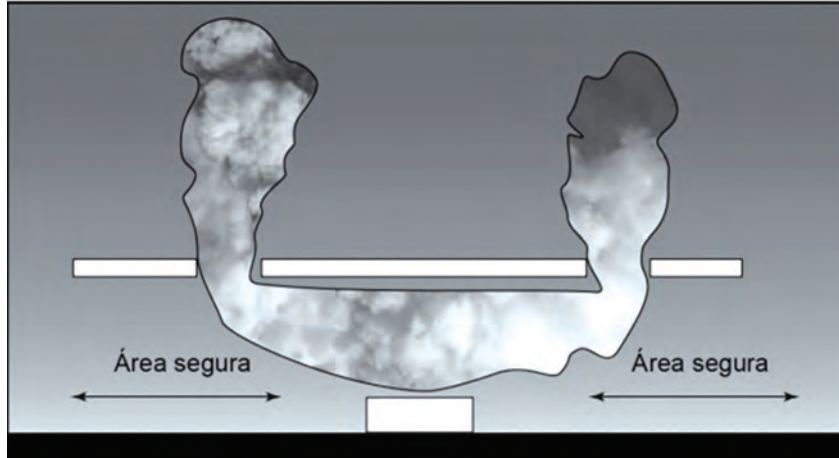


Figura 16.8. Fuego en la estructura parcialmente cerrada.

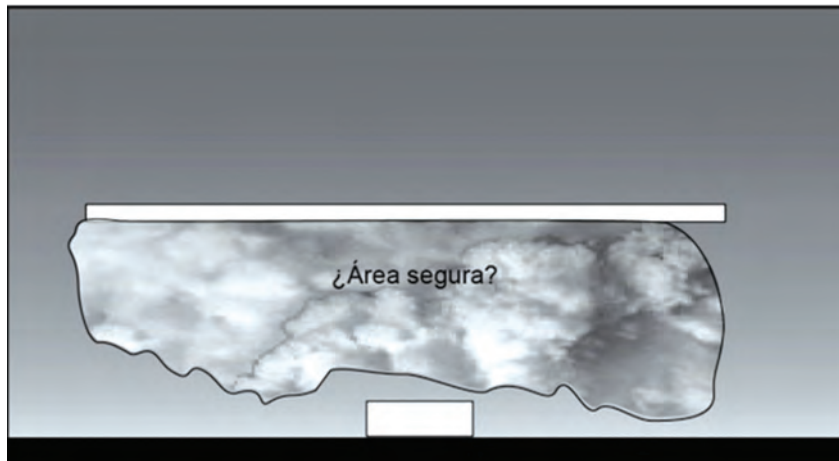


Figura 16.9. Fuego en la estructura cerrada (sin ventilación).

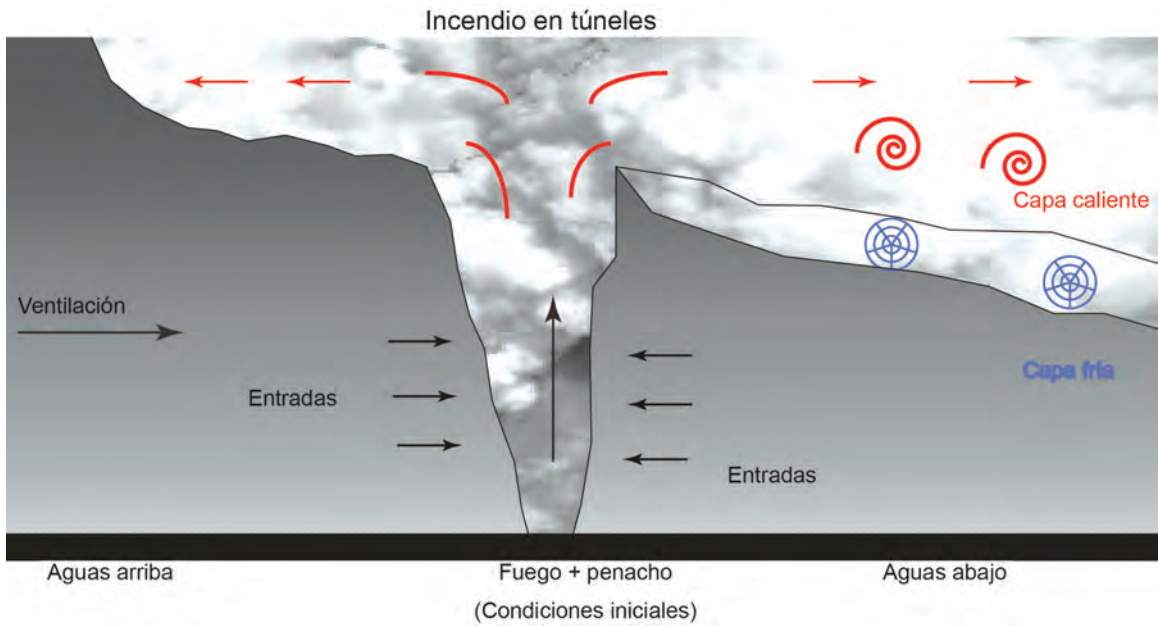


Figura 16.10. Comportamiento de la capa de humos en túneles.

Desde el punto de vista de la seguridad en caso de incendio, los objetivos que deben cumplirse son:

- Mantener controlada la nube de humos lo más lejos posible de los usuarios.
- Para conseguirlo debe mantenerse en la medida de lo posible, la estratificación de la misma o expulsarla a gran velocidad si las personas situadas en la zona de abajo del incendio ya han sido evacuadas.
- Evitar la distribución de los humos a zonas próximas al túnel pero no implicadas en el incendio (locales técnicos, otro cuerpo en túneles comunicados, galerías de escape o de emergencia, etc.).
- Ayudar en las tareas de salvamento a los equipos de rescate.

En caso de accidente la computadora hace lo que le ha sido ordenado y eso no siempre pasa con los operarios, especialmente si tienen que tomar decisiones en poco tiempo y con una gran presión. La tendencia actual es disponer de pautas pre-programadas de medidas tras estudiar los cientos de casos que se obtienen al hacer variar la diferencia de presión entre los portales, el lugar del incendio, la intensidad de tráfico, etc.

Todos esos parámetros son actualizados de forma continua por el sistema de control de los grandes túneles y, en función de ellos es posible recomendar un tipo de actuación. La computadora determina esa pauta en segundos y aconseja una forma de actuar a la espera de la conformidad del operario de control. Si al cabo de dos o tres minutos éste no se decide o no está presente, la computadora desencadena la actuación prevista. Es importante mencionar que los primeros minutos son cruciales para controlar el incendio para favorecer la evacuación.

### **16.5.2. La seguridad ante un incendio**

El objetivo irrenunciable de la seguridad ante un incendio es garantizar las condiciones de supervivencia para las personas implicadas en dicho incidente. Este objetivo, genérico, recopilado por toda la normativa y reglamento en la materia, se despliega en matices para cada tipo de infraestructura o edificio.

El túnel es un medio psicológicamente hostil para los conductores por varios motivos:

- Cambio de las condiciones ambientales y físicas en la entrada y salida del túnel, (sección, luz, aire... etc.)
- Espacio limitado a la sección transversal.
- Efectos psicológicos que pueden incidir sobre el conductor: claustrofobia, miedo...etc.
- Mayor repercusión que a cielo abierto, de cualquier daño, accidente, o incendio.

Para la seguridad del túnel, la hipótesis de un incendio en su interior es la más desfavorable porque, además de las consecuencias intrínsecas al propio accidente que lo produce, la existencia de materiales, cargas o fluidos combustibles en los vehículos involucrados puede aumentar con rapidez el desarrollo y evolución del incendio inicial, lo que puede provocar que dicho suceso llegue a alcanzar consecuencias y daños de dimensiones catastróficas en vidas y bienes.

El humo generado por causa de un incendio tiene tres efectos que provocan lesión sobre las personas expuestas a su acción:

- Oscuridad, que dificulta la huida debido a la falta de visibilidad.
- Toxicidad, que incapacita a las personas para una huida rápida y, finalmente, puede producir la muerte. Sus efectos dependerán de la naturaleza de los elementos tóxicos presentes en el humo, de su concentración y del tiempo de exposición a los mismos.
- Temperatura que aturde y dependiendo del tiempo de exposición puede causar la muerte.

Sin olvidar otros efectos producidos por el incendio, como es la propia radiación debida a la combustión de los materiales presentes en el escenario de incendio, se establece la distinción con el humo por presentar éste sus efectos a una mayor distancia del foco del incendio, siendo por ello crítico para la evacuación.

Para disminuir los efectos del humo es importante diseñar un sistema de ventilación, sin embargo lo es más la definición de la estrategia y pautas de actuación de dicho sistema en caso de incendio.

Entiéndase como pauta de actuación, la estrategia secuencial de operación sobre el sistema de ventilación que responde y resuelve una determinada situación de incendio.

Ante situaciones con incendio en el interior del túnel, la primera medida consistirá en facilitar la evacuación de las personas más próximas al lugar del incendio a través de los itinerarios de evacuación existentes mediante el confinamiento de la nube de humos durante un tiempo suficiente, para proceder a la extracción o en su caso, al barrido del humo, y facilitar las labores de extinción.

Para ello, se deberá actuar sobre el sistema de ventilación partiendo de las condiciones de funcionamiento en el momento del incendio y conociendo datos tales como condiciones ambientales, dirección y densidad de tráfico, tipo de vehículos involucrados, magnitud y potencia.

### 16.5.3. Extracción del humo en un incendio

Un sistema con ventilación transversal pura, funciona introduciendo el aire limpio en el túnel mediante un colector independiente en la cavidad del túnel, que generalmente abastece a varios ramales secundarios y que a su vez comunican con los puntos de inyección de aire del túnel en la parte inferior de la sección en la calzada.

El aire de extracción es recogido por unas rejillas situadas en la parte superior y conducido a través de unos conductos al exterior del túnel.

En realidad, cuando se produce un incendio importante, los túneles equipados con un sistema de ventilación transversal pura, se comportan como si tuvieran un sistema semitransversal, debido a que no consiguen solucionar todo el humo que genera en un espacio de tiempo tan reducido.

Los puntos de inyección de aire limpio, de los sistemas transversales, suelen estar en los hastiales del túnel a nivel de la calzada, mientras que los puntos de succión del aire viciado, están en la clave del túnel. A veces también se coloca en los colectores de ventilación, un tabique falso, dividiendo en dos, que se adosa a la clave, de manera que tanto la inyección como la succión se realizan por la parte superior del túnel. El mejor sistema, es el que inyecta aire desde el nivel de la calzada y succiona a nivel de clave, porque el aire resultante en el interior del túnel es más limpio.

Tanto la inyección de aire fresco como la succión del viciado, requiere su correspondiente equipo mecánico. En caso de incendio, el ventilador que succiona será el más vulnerable, puesto que todos los gases calientes generados por el incendio, pasarán a través de él. Los expertos recomiendan extraer todo el humo generado en un incendio, en una longitud de túnel de 400 m aproximadamente, es decir que el sistema de extracción debe ser capaz de sacar la totalidad del humo en los elementos del dominio establecido en ese espacio limitado, para evitar la propagación del humo a lo largo del túnel.

Este último aspecto es el punto débil de este sistema de extracción, ya que es bastante difícil conducir esa gran cantidad de humo generado en tan poco tiempo, hacia un sentido determinado, sin poder evitar la propagación de humo en el sentido más desfavorable, que siempre será en aquel en el que se encuentran los vehículos detenidos.

Estos efectos negativos a veces no solo están motivados por la falta de conjunción entre la capacidad de extracción del sistema y la premura de tiempo, sino porque existen agentes que influyen desfavorablemente en el comportamiento del aire en el interior del túnel, son aleatorios y de difícil control, como puede ser el viento, el efecto chimenea, etc. En definitiva todos los movimientos de aire longitudinales que provocan turbulencias con el humo estratificado y por consiguiente expansión de la nube de humo hacia los vehículos parados.

#### **16.5.4. Recomendaciones de la Asociación Internacional Permanente de los congresos de carreteras (P.I.A.R.C.) sobre ventilación transversal**

Las recomendaciones que hace la Asociación Mundial de la Carretera a través de sus comités técnicos, sirven actualmente como referencia de primer orden a la hora de dimensionar una ventilación transversal en un túnel. Es importante considerar estas recomendaciones, ya que la mayoría de los diseños consideran estas normas.

En la publicación *Fuego y Humo en interior de un Túnel* en su artículo V.8. Recomienda las siguientes prescripciones:

Todos los conductos deben ser completamente cerrados e incomunicados.

Conseguir que la estratificación de los humos permanezca en las capas superiores el mayor tiempo posible.

La velocidad longitudinal del aire debe ser inferior a 2 m/seg. En caso de velocidades más altas comienzan turbulencias entre el humo y el aire fresco.

Con una velocidad del aire alrededor de 2 m/seg, la mayoría del humo se separa a un lado (efecto backlayering) y comienza a avanzar en la sección en una distancia aproximada de 400 a 600 m en sentido descendiente al fuego. Puede ser determinante si la detección del fuego no es lo suficientemente rápida.

Con velocidades prácticamente cero, la estratificación puede durar unos 10 minutos, después de este tiempo el humo desciende debido al enfriamiento de los gases. Los vehículos parando bruscamente generan un incremento de la velocidad longitudinal.

En un sistema transversal, los elementos encargados del aporte de aire fresco a nivel de suelo, inducen una rotación en el aire del interior del túnel que provoca un arrastre de los humos hacia la calzada y por lo tanto rompe la estratificación. Por lo anterior se recomienda sobredimensionar entre 1/2 y 1/3 el aporte de aire fresco y por consiguiente el de extracción. Este dato es importante ya que sobredimensiona la instalación de una forma significativa.

El cambio del sistema en estado de confort al estado de incendio debe de hacerse lo más rápido posible, por lo que es prioritario detectar lo antes posible la incidencia.

Las compuertas tanto de extracción como de impulsión de aire tienen que ser automáticas, bien mediante motores o mediante electroimanes que detectan el calor y salta un resorte, este último tiene el inconveniente del rearme.

Una vez establecido el tipo de incendio para el que se ha dimensionado el sistema, se obtiene una capacidad de generación de humos. Los sistemas de extracción deben de estar dimensionados en exceso para poder extraer la tasa de humo generado.

También es importante detectar la posición exacta del fuego y acotar la zona de trabajo, de esta forma se actuará en la zona donde se está generando el humo y por lo tanto todos los recursos disponibles de extracción de humos potenciarán una zona en concreto, especialmente en túneles largos.

El valor recomendado para la extracción se cuantifica según la velocidad longitudinal a través de la sección, se debe de conseguir combatir una velocidad de propagación de humos denominada backlayering que depende de la carga de fuego y que puede ser aproximadamente entre 3 y 4 m/seg.

Se recomienda que la entrada de aire fresco sea a nivel de calzada para que el barrido de la sección sea transversal y no se conseja el aporte de aire por la parte superior.



### 16.5.5. Ámbito Normativo

En México por la falta de Normas referente a los Sistemas de Ventilación para túneles de Carretera, toma como referencia el reglamento del Parlamento Europeo, aprobado el 29 de abril de 2004 por la directiva 2004/54/CE sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras y normas Europeas Vigentes.

A continuación se exponen las más importantes normas que regulan la seguridad en túneles y que a lo largo de este manual se citarán:

- Normativa Italiana del Ministerio de Transportes, sobre túneles carreteros.
- IOS-98 (Normativa Española de Túneles) - BOE del 1 de Diciembre de 1998 por el Ministerio de Fomento, Instrucción para el proyecto, construcción y operación de obras subterráneas para el transporte terrestre, donde se fijan los sistemas mínimos necesarios en los túneles, determina la necesidad de ciertas instalaciones (ventilación, iluminación, energía, sistema contra incendios, señalización y control de tráfico, etc.) en función de características del túnel como longitud, tráfico (frecuencia y tipo), trazado, sección, etc., que clasifican a los túneles según tres niveles de servicio.
- Manual de Autoprotección – Real Decreto 132 de 29 de junio de 1990. En él se describen las directrices para la elaboración de un Plan de Emergencia contra Incendios y de Evacuación de Locales y Edificios. Aunque este Manual no se refiere directamente a operaciones como las de un túnel, viene siendo casi la única orientación para la definición de los recursos movilizados en túneles viarios en respuesta a incidentes y emergencias.
- Transporte de Mercancías Peligrosas (R.D. 2115/1998 de 2 de octubre, B.O.E. 248 de 16.10.98).
- Circular Interministerial francesa 2000-63 de Agosto de 2000. Su publicación es resultado del trabajo de un grupo de expertos que analizaron el grave incendio del Mont Blanc. En ella se establecen procedimientos técnicos APRA la puesta en servicio de nuevos túneles y modalidades de seguimiento de la operación. Igualmente, para túneles ya en operación, se define el trámite que han de seguir para acomodar equipamiento y obra de seguridad, junto a la operación y a las nuevas exigencias.
- P.I.A.R.C. (Asociación Mundial de la Carretera) elaborada por el comité técnico de túneles carreteros.

Hasta ahora, las recomendaciones de la (P.I.A.R.C.), del Centro de estudio de los túneles (CETU) del Ministerio de Fomento del Gobierno Español y de otras instituciones Internacionales, junto a la elevada calificación de los operadores y proyectistas, habían venido siendo la guía a la hora de efectuar los proyectos, construcción y operación de los túneles.

Todo este conjunto de normativas y recomendaciones ha hecho que las exigencias sean mucho mayores para los responsables de operación de los mismos. Sin embargo, no contaban con normas que definieran con precisión sus obligaciones y les garanticen la entrega de un túnel con unas condiciones de seguridad suficientes (obra civil, instalaciones, infraestructuras).

En cuanto a la normativa española, el Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carretera del Estado, no establece pautas sobre qué sistema de ventilación utilizar según las características del túnel. Sin embargo en otros países hay normativas o recomendaciones sobre ventilación en túneles, las cuales son utilizadas frecuentemente en España e igual de importantes.

Normativas o recomendaciones de otros países relativo a la ventilación en túneles:

- Japón: Asociación de Carreteras. “Tunnel Ventilación Design Guidelines”, Japón, 1985
- Alemania: Norma Alemana en Túneles. (RABT 06)
- Países Bajos: “Ventilation of Road Tunnels”. Julio 1991



- Francia: Ventilation. Les dossiers pilotes du Cetu. Noviembre 2003
- Austria: “Design guidelines Tunnel Ventilation”, (FVS 97)
- Países Nórdicos: “Norwegian Design Guide – Road Tunnels” (PAR Diciembre 1990)
- Suecia: “Tunnel 95 – General Technical Specification” Publ. 1995:32E, Sweden, 1996

A continuación en las tablas siguientes se observan los sistemas de ventilación conforme a la longitud del túnel y el sentido de la circulación recomendado en Francia.

### Túneles urbanos unidireccionales

Longitud	No ventilador	Ventilador, longitudinal	Ventilador, transversal
300 m < L < 500 m	Prohibido	Posible	Posible
500 m < L < 1000 m	Prohibido	Posible	Posible
1000 m < L < 3000 m	Prohibido	Posible	Posible
3000 m < L	Prohibido	Posible	Posible

### Túneles urbanos bidireccionales

Longitud	No ventilador	Ventilador, longitudinal	Ventilador, transversal
300 m < L < 1000 m	Prohibido	Prohibido	Posible
1000 m < L < 3000 m	Prohibido	Prohibido	Posible
3000 m < L	Prohibido	Prohibido	Posible

### Túneles no urbanos unidireccionales con tráfico mediano-alto

Longitud	No ventilador	Ventilador, longitudinal	Ventilador, transversal
300 m < L < 500 m	Posible	Posible	Posible
500 m < L < 800 m	Prohibido	Recomendado	Posible
800 m < L < 3000 m	Prohibido	Recomendado	Posible
3000 m < L < 5000 m	Prohibido	Recomendado	Posible
5000 m < L	Prohibido	Recomendado	Posible

### Túneles no urbanos bidireccionales con tráfico mediano-alto

Longitud	No ventilador	Ventilador, longitudinal	Ventilador, transversal
300 m < L < 500 m	Posible	Posible	Posible
500 m < L < 800 m	Prohibido	Recomendado	Posible
800 m < L < 3000 m	Prohibido	Recomendado	Posible
3000 m < L < 5000 m	Prohibido	Recomendado	Posible
5000 m < L	Prohibido	Recomendado	Posible

Tabla 16.1. Sistema de ventilación para túneles.

## 16.6. VENTILACIÓN DE EMERGENCIA

### 16.6.1. Generalidades

Los sistemas de ventilación de emergencia y los procedimientos operativos del túnel deberán ser desarrollados para maximizar el uso del sistema de ventilación para el removimiento y control de humo y gases calientes que son resultado de emergencias de incendio dentro del túnel.

El sistema de ventilación de emergencia no deberá ser requerido en túneles menores a 1,000m (3280 pies) de longitud, donde pueda ser mostrado por un análisis de ingeniería, usando los parámetros de diseño para un túnel en particular (Longitud, sección de cruce, grado, viento dominante, dirección del tráfico, tipos de carga, diseño, tamaño del incendio, etc.), que el nivel de seguridad proporcionado por un sistema de ventilación mecánico pueda ser igualado o excedido, mejorando los medios de salida, el uso de ventilación natural, o el uso de almacenamiento para el humo, y deberá ser permitido solo cuando se apruebe por las autoridades competentes.

La ventilación de emergencia deberá ser requerida en túneles que excedan 1,000 m (3280 pies).

Para cualquier análisis de ingeniería realizado para determinar la necesidad de ventilación de emergencia del túnel, el potencial incendios inmediatamente próximo al portal del túnel, pero fuera de él, que puede tener un impacto negativo en el medio ambiente del túnel y se deberá incluir en el análisis de ingeniería.

Los procedimientos operacionales de la ventilación de emergencia deberán ser diseñados para asistir en la evacuación o rescate, o ambos, de los automovilistas dentro del túnel.

La ventilación de emergencia deberá ser escalada para alcanzar los requisitos mínimos de ventilación con un aspa fuera de servicio o deberá proporcionar medidas operacionales para asegurar que no se ponen en peligro vidas con un ventilador fuera de servicio.

### 16.6.2. Control de humo

El sistema de ventilación de emergencia deberá proporcionar un medio para controlar el humo.

En todos los casos, la meta deseada deberá ser la de proporcionar un camino de evacuación para los automovilistas que están saliendo del túnel y para facilitar las operaciones de combate al incendio.

En túneles con tráfico bidireccional donde los automovilistas pueden estar en ambos lados del sitio del incendio, se deben de alcanzar los siguientes objetivos:

1. La estratificación del humo no debe de ser interrumpida
2. La velocidad de aire longitudinal debe de mantenerse en magnitudes bajas
3. La extracción de humo a través de aperturas del techo o aperturas elevadas a lo largo de los muros del túnel es efectiva y debe de ser considerada.

### 16.6.3. Objetivos del diseño

Los objetivos de diseño de los sistemas de ventilación de emergencia deberán controlar, extraer, o controlar y extraer humo y gases calientes como sigue:

- Una corriente de aire no contaminada se proporciona a los automovilistas en ruta (s) de salida de acuerdo con el previsto plan de respuesta de emergencia.
- Caudales de aire longitudinales se producen para evitar backlayering de humo en un camino de salida fuera de un incendio.

#### 16.6.4. Bases del diseño

El diseño del sistema de ventilación de emergencia deberá estar basado en un escenario de incendio con tasas de liberación definidas, tasas de liberación de humo y tasas de liberación de monóxido de Carbono, variando en función del tiempo. La selección de un escenario de incendio deberá considerar los riesgos operativos que están asociados con los tipos de vehículos que usarán el túnel. El peor escenario, deberá considerar un incendio en una ubicación en la que el requisito más estricto del rendimiento del sistema de ventilación, sea anticipado por un análisis de ingeniería.

El tamaño del incendio de diseño [Tasa de liberación de calor producido por un vehículo (s)] deberá ser usado para diseñar el sistema de ventilación y emergencia.

La selección del tamaño del incendio en el diseño (tasa de liberación de calor) deberá considerar los tipos de vehículos que se espera circulen por el túnel. También la falla o pérdida de disponibilidad del sistema de ventilación de emergencia, deberá ser considerado.

### 16.7. ENSAYOS EN TÚNELES

Los ensayos in situ permiten evaluar de una forma más aproximada lo que será el funcionamiento del túnel, permitiendo, además, validar los resultados obtenidos por los modelos numéricos. Sin embargo, el alto precio que conllevan los ensayos a escala real de un túnel, así como la dificultad de realizarlos para todos los escenarios estudiados mediante los modelos numéricos, hace que ambas herramientas se complementen con el fin de entender el comportamiento del sistema de ventilación de un túnel.

El objetivo de estos ensayos, es la verificación de la seguridad ante incendio, relativa al control de humos en el interior del túnel, mediante la ejecución de una prueba que permita validar las pautas de actuación del sistema de ventilación ante un incendio.

El hecho de realizar ensayos de incendio en túneles, ya sea en túneles en servicio, o túneles de obra nueva, es una necesidad ineludible, ya que es la única manera de:

- Verificar de forma real las prestaciones del sistema de “Control de incendios” del túnel en las condiciones más próximas posibles a un incendio real; precisamente por ello el ensayo debe realizarse con humos calientes que se estratifican en el interior del túnel y tengan un comportamiento análogo al del incendio real, e incluso representen el peligroso efecto de difusión o “Backlayering”.
- Validar el diseño del sistema de ventilación y sus pautas de actuación en caso de incendio.
- Formar a los equipos de seguridad, extinción y emergencia, tanto a los encargados de operarla, como a protección civil y bomberos, en una emergencia realista de incendio en el túnel, detectando necesidades, oportunidades y carencias.
- Mostrar a la sociedad una apuesta decidida por la seguridad de una infraestructura que despierta una sensibilidad especial en los conductores, agravada por las catástrofes ocurridas en los últimos años a nivel mundial.

#### 16.7.1. Ensayo sin humos

La imagen predispuesta sobre los ensayos en túneles suele corresponderse a lo que se conoce como ensayos de fuego. En realidad, una gran parte de los ensayos realizados en un túnel no son más que verificaciones de todos los sistemas que en él existen.

No sólo es preciso comprobar que cada equipo funciona correctamente, sino que el conjunto de las instalaciones del túnel trabajan de la misma manera. Precisamente este tipo de ensayos suele revelar los defectos más trascendentes. La enorme complejidad de cada uno de los sistemas instalados se refleja en la ardua tarea de compatibilizarlos a todos.

Además, este tipo de ensayos debe realizarse periódicamente para asegurar que las labores de mantenimiento no se centran únicamente en los equipos relacionados con el funcionamiento en servicio del túnel, sino con las situaciones de emergencia. Debe tomarse en cuenta que los sistemas que sólo intervienen en caso de accidente, no se utilizan habitualmente pero cuando se emplean suelen involucrar situaciones de riesgo de gran trascendencia por lo que hay que reducir la posibilidad de fallo.

En los sistemas de ventilación longitudinal es necesario comprobar no sólo la correcta instalación de los equipos, sino que las exigencias de caudal previstas son alcanzadas en las situaciones más extremas.

En los sistemas de ventilación semi o transversal, las comprobaciones se multiplican. Es necesario verificar que los caudales de soplado y extracción se cumplen (las fugas por los conductos suelen ser elevadas reduciendo la capacidad del sistema), que las trampillas de extracción de humos se abren o cierran correctamente (de forma local o automática).

Y por último, que el sistema de control pueda gestionar todos los sistemas en tiempo real incluso en caso de situaciones críticas con gran número de fallos en el sistema o de situaciones anómalas. En caso de que exista un sistema de ventilación auxiliar para otras dependencias o locales habrá que verificar la capacidad del sistema.

Debe tomarse en cuenta que en este tipo de sistemas, existen dispositivos redundantes para situaciones de emergencia adicionales (ventiladores de reserva por daños de otros, sistemas automáticos de respuesta, etc.).

### **16.7.2. Ensayos con humos**

Existen dos tipos de ensayos:

- Ensayo de humo frío
- Ensayo de humo caliente

#### **16.7.2.1. Ensayo de humo frío**

Los ensayos con humos fríos pretenden mediante botes de humo abiertos a un cierto ritmo, reproducir el comportamiento de los gases y ver cómo evoluciona según la ventilación existente. Son empleados habitualmente para verificar la capacidad global de extracción del sistema de ventilación.

Para realizar el ensayo, se disponen bandejas con botes de humo frío que mediante un sistema de apertura controlada producen una cantidad predeterminada. Con base en lo anterior, se puede estudiar el comportamiento de la nube de humos en función de la actuación que se realice sobre el sistema de ventilación. Sin embargo, la desventaja de este tipo de ensayos, es que no se refleja el comportamiento real de los humos de un incendio en los que la flotabilidad del gas, crea una estratificación sobre el aire limpio si las condiciones de ventilación son favorables. Por ello se realizan ensayos de humos calientes.

#### **16.7.2.2. Ensayo de humo caliente**

Si los ensayos de humos fríos son difíciles de realizar e interpretar, los correspondientes de humos calientes requieren una preparación excepcional.

Los objetivos para el ensayo de fuego son los que determinan la dificultad existente y la inversión necesaria. Entre ellos la determinación, para el túnel ensayado, de la capacidad del sistema de ventilación ante la situación de accidente con fuego y la validación de los métodos numéricos empleados.

Sin embargo, una vez que se ha finalizado una construcción de semejante envergadura el ensayo de incendio suele ceñirse a un escenario definido con unas condiciones concretas. Para llevarlo a cabo se protege la estructura frente al fuego, se colocan sensores de temperatura, CO, opacidad y velocidad del aire e incluso cámaras de video para registrar el ensayo y facilitar el posterior análisis de los resultados.

Otro objetivo es la comprobación de los planes de emergencia, la coordinación de los servicios de rescate y la concientización de las autoridades implicadas en la seguridad del túnel.



Figura 16.11. Ensayo de humos.

## REFERENCIAS

- 1 Abella A. / García I. / Hacer F. El Túnel, Un Paso Más en el Camino, Seguridad, Normativa e Instalaciones. Arts&Press, 2012.
- 2 Asociación Mundial de Carreteras (AIPCR), Manual de Túneles de Carretera, <http://www.piarc.org>, (2011).
- 3 PIARC. Fire and Smoke Control in Road Tunnels. ISBN 2-84060-064-1.2004. PIARC.
- 4 PIARC. Technical Committee C.5. "Systems and Equipment for Fire and Smoke Control in Road Tunnel", 2007.
- 5 PIARC. Technica Committee C.3.3 "Risk Analysis for Road Tunnels", 2008.
- 6 Horn, Ven. "Integrated Approach to Road Tunnel Safety". PIARC. Marzo 2006.
- 7 Normativa de EEUU: NFPA 502 Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways, National Fire Protection Association, 2014.
- 8 Normativa Europea: Directiva 2004/54/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo sobre Reque- rimientos Mínimos de Seguridad en Túneles de la Red Transeuropea de Carreteras, 29 de abril de 2004, con corrección de errores de 7 de junio.
- 9 Normativa española: Real Decreto 635/2006, 26 mayo, sobre Requisitos Mínimos de Seguridad en los Túneles de la Red de Carreteras del Estado.
- 10 Centre d'Estudes des Tunnels. Les dossiers pilotes du Cetu. "Ventilation" sección 4.1. Novembre 2003.
- 11 SP Technical Research Institute of Sweden. Desing Fire Curves in Tunnels. INGASON, H. 2009.
- 12 Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras, 2013.
- 13 Normativa SCT. N-PRY-CAR-10-01-001-13, 2013
- 14 Normativa SCT. N-PRY-CAR-10-01-002-13, 2013

