

INFLUENCIA DE LA VENTILACIÓN SOBRE LOS INCENDIOS EN TÚNELES

José Luis Fuentes-Cantillana Isusi

Tunnel Safety Testing, S.A. 33189 Siero (Asturias)

e-mail: info@tunneltest.com. web: www.tunneltest.com

EFFECTOS DE LOS INCENDIOS EN ESPACIOS CONFINADOS

En los túneles, como en cualquier otro espacio confinado, los incendios tienen una peligrosidad especial, ya que la dificultad de evacuación de los humos y la peor disipación del calor generado hace que sus efectos sean mucho mayores que si el mismo incendio se produjese a cielo abierto.

Los efectos del incendio son básicamente de dos tipos:

Calor

Conforme a las distintas curvas tipo de combustión y a las experiencias realizadas en este campo, en los incendios en túneles pueden llegar a alcanzarse temperaturas de hasta 1.350 °C, si se trata de incendios no controlados y que tengan una cierta magnitud. Estas temperaturas, además de ser incompatibles con la vida, pueden producir daños importantes a la propia estructura del túnel.

En este sentido, conviene recordar que el acero empieza a perder resistencia a la tracción a partir de 200 °C, y el hormigón a partir de los 300 °C. Además, a partir de estas temperaturas pueden darse fenómenos de “spalling”, o estallido del hormigón, por la presión interna generada al vaporizarse su agua intersticial [1, 2, 3]. A título de ejemplo, la norma francesa limita la temperatura de la cara externa del hormigón de los túneles a 350 °C, y la de las armaduras interiores a 250 °C .

Lógicamente, es en la zona más próxima al incendio donde se alcanzan las temperaturas más elevadas y donde se dan por tanto los efectos más importantes del calor, y aunque la temperatura desciende rápidamente con la distancia, todavía puede mantenerse unos cientos de metros por encima de los niveles señalados. Si bien hasta ahora no se sabe de ningún túnel cuyo sostenimiento se haya hundido totalmente por causa de un incendio, sí se ha observado con frecuencia el fallo de estructuras más ligeras como son algunos revestimientos o los falsos techos usados para la ventilación (ver Figura 1).

Por otra parte, el calor producido por un incendio de mediana intensidad muy probablemente destruirá los equipamientos instalados en la zona afectada que no estén adecuadamente protegidos. Esto puede ser especialmente peligroso en el caso de elementos críticos como son los sistemas de señalización y control y la alimentación eléctrica a los equipos de ventilación. También hay que tener en cuenta el posible fallo de anclajes y otros elementos auxiliares de sujeción, que pueden no estar diseñados para soportar esas temperaturas.



Figura 1 : Hundimiento del falso techo en el incendio del túnel de San Gotardo (2001)

Los ventiladores, por su parte, deben estar ensayados y certificados para soportar una temperatura elevada durante un determinado periodo de tiempo. Conforme a la Directiva Europea de Productos de la Construcción (89/106/CE), los ventiladores para túneles deben ensayarse conforme a la norma UNE-EN 12101-3:2002, que contempla diversas clases de temperatura, siendo la más habitual en los túneles la F400, que implica un ensayo a 400 °C durante 2 horas, sin que el rendimiento (caudal) del ventilador disminuya más de un 10 %. La firma TST realiza este tipo de ensayos en sus instalaciones de San Pedro de Anes, en Asturias (ver Figura 2).

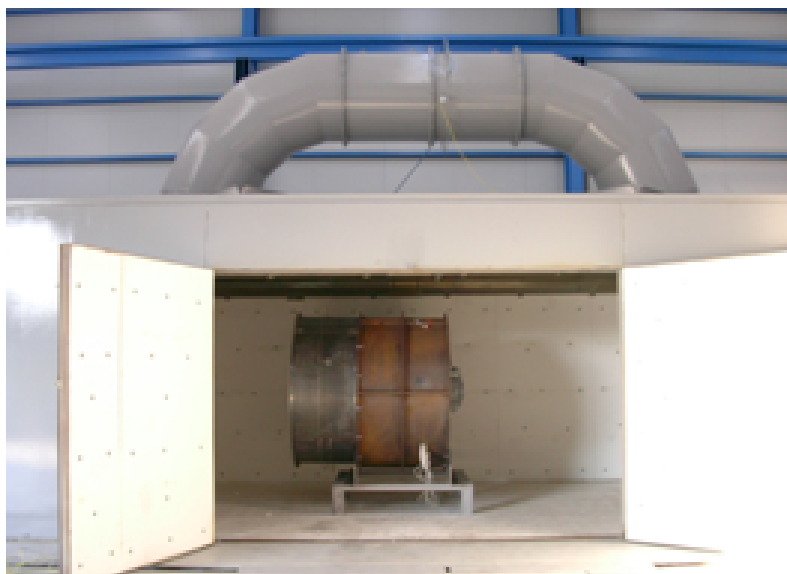


Figura 2: Ensayo a alta temperatura de ventiladores para túneles en TST

Humos

Si bien el calor es el componente más destructivo del incendio, sus efectos principales se limitan por lo general a la zona próxima al foco del incendio. Por contra, el humo, que se produce en grandes cantidades en un incendio de este tipo, se distribuye por el túnel de forma bastante rápida, y puede afectar a una gran parte del mismo, en función de las características y la regulación del sistema de ventilación.

El principal problema del humo es que limita enormemente la visibilidad, y dificulta de manera sustancial la evacuación de los usuarios del túnel, al provocar su desorientación. A efectos de los análisis de riesgos, debe considerarse que la evacuación es muy difícilmente realizable en una zona que haya sido invadida por el humo, si éste está situado al mismo nivel que las personas.

Por otra parte el humo contiene una gran cantidad de contaminantes, como son el monóxido de carbono (CO), producido por la combustión incompleta del material combustible, el ácido cianhídrico (HCN), que se produce al arder algunos productos textiles y plásticos, y diversos compuestos fluorados y clorados que se derivan principalmente de la combustión de plásticos y pinturas. Estos productos son altamente tóxicos y producen la muerte por envenenamiento, si bien su efecto está algo más retardado en el tiempo que el anteriormente mencionado de la pérdida de visibilidad.

MAGNITUD DE LOS INCENDIOS EN TÚNELES

La magnitud de un incendio en un túnel viene dada por su potencia, o tasa de liberación de calor (en inglés *Heat Release Rate* o HRR), que se expresa en MW. Evidentemente, cuanto mayor sea la potencia más destructivos serán los efectos del incendio, y más difícil será de controlar.

El principal combustible de los incendios en los túneles son los propios vehículos que circulan por el mismo. No sólo por el propio combustible de los motores de explosión, sino también por elementos que siempre están presentes como son aceites y grasas, ruedas, tapicerías, plásticos, etc. A esto hay que sumar la carga que llevan los vehículos, y que muchas veces es altamente combustible, aunque dicha carga no esté catalogada como mercancía peligrosa. A título de ejemplo, basta recordar que en el incendio del túnel del Mont Blanc de 1999 lo que ardió fue un camión de margarina, y en el de San Gotardo de 2001 fue un camión cargado de neumáticos. En el desastre del funicular de Kaprun del año 2000 la principal carga de fuego fue la ropa y los equipajes de los esquiadores que iban en el mismo.

En base a todo ello, puede deducirse que la potencia de un incendio en un túnel es muy variable, pues depende de la carga de fuego y, como se verá más adelante, también del régimen de ventilación.

La Tabla 1 resume los datos disponibles en la literatura existente al respecto, y que se basa por lo general en experimentos realizados en condiciones controladas. Una hipótesis usual hasta ahora para el diseño de sistemas de ventilación era considerar un incendio de 30 MW, que es la HRR teóricamente correspondiente a un camión de mercancías. Sin embargo, las diversas investigaciones llevadas a cabo tras los incendios importantes ocurridos en túneles durante los últimos años, han revelado que las potencias reales de éstos han sido en general bastante superiores a lo que inicialmente podía haberse esperado, por lo que hoy en día el valor de referencia a efectos de

proyecto debería basarse en un análisis de riesgos específico para cada túnel, que tenga en cuenta el tipo y densidad de tráfico, y las dimensiones y configuración del túnel.

Tabla 1: Características medias de los incendios en túneles según el tipo de vehículo afectado (según Ingasson 2001 y Sipp 2002)

Tipo de vehículo	Potencia (HRR) MW	Max. temp. en paredes del túnel (°C)	Producción de humo (m3/s)
Turismo	2,5 - 5	400	20
2-3 turismos	8	-	30
Furgoneta	15	-	50
Autobús	20	800	60-90
Camión de mercancías	20-30	1000	60-90
Vagón de metro	35	-	-
Camión cisterna	100-300	1200-1400	> 100

EFFECTOS DE LA VENTILACIÓN SOBRE EL INCENDIO

Hoy en día la mayor parte de los túneles de cierta longitud cuentan con ventilación mecánica, que tiene una doble función:

- En funcionamiento normal del túnel, su misión es reducir hasta niveles admisibles la concentración de contaminantes en la atmósfera interior del túnel, por motivos de visibilidad y de toxicidad.
- En caso de incendio, y según la definición de la PIARC, el sistema de ventilación tiene los siguientes objetivos, por orden de prioridades [4]:
 1. Salvar vidas facilitando la evacuación de las personas
 2. Facilitar las operaciones de rescate y extinción
 3. Evitar el riesgo de explosiones
 4. Limitar los daños a la estructura y equipamiento del túnel y edificios colindantes

Hoy en día, es sobre todo la actuación en caso de incendio la que condiciona el diseño de los sistemas de ventilación de los túneles.

La ventilación afecta al incendio de varias maneras:

Aspectos positivos

Una ventilación bien diseñada y controlada ayuda a desplazar los humos hacia la zona que más convenga para, en primera instancia, permitir la evacuación de los usuarios del túnel y, en una segunda fase, facilitar el acceso de los equipos de intervención para la extinción del incendio.

Por otra parte, el aire de la ventilación enfría la zona de incendio, limitando en alguna medida los efectos del fuego sobre la estructura y los equipamientos del túnel.

Además, y si la ventilación es lo suficientemente fuerte como para desplazar las llamas de la vertical del foco del incendio, se reduce la radiación de calor sobre éste, lo que reduce la tasa de liberación de calor (HRR) o potencia del fuego.

Aspectos negativos

El mayor aporte de aire que supone la ventilación mejora la combustión, por lo que tiende a avivar el fuego. A diferencia con un fuego a cielo abierto, donde el combustible tiene en principio todo el aporte de oxígeno que necesita para la combustión, en espacios confinados como los túneles la potencia del fuego suele estar controlada por el aporte de aire fresco que realiza la ventilación. Esta situación se denomina “incendio controlado por la ventilación”, a diferencia del caso anterior, en el que el incendio está controlado por la propia disponibilidad y características del combustible (“incendio controlado por el combustible”).

De hecho, la máxima potencia que puede darse en un incendio en un túnel (suponiendo que hay combustible ilimitado), puede aproximarse por la expresión siguiente [5]:

$$Q_{\max} = 2,73 \cdot Q$$

Donde:

Q_{\max} es la potencia máxima del incendio (HRR), en MW

Q es el caudal de ventilación del túnel, en m^3/s

Por otra parte, la inclinación de las llamas que se produce a regímenes altos de ventilación puede facilitar la propagación del incendio desde el foco inicial a otros próximos, como por ejemplo de un vehículo a otro, si están lo suficientemente cerca.

En definitiva, un exceso innecesario de ventilación sólo consigue aumentar la potencia y la propagación del incendio. Según todos los indicios, algo así ocurrió en el incendio del túnel de La Mancha ocurrido en 1996, donde se piensa que la principal causa de que el incendio alcanzase la increíble potencia de 350 MW fue el hecho de mantener una elevada ventilación incluso después de completada la evacuación del personal que iba en el tren siniestrado.

EVOLUCIÓN DE UN INCENDIO EN AUSENCIA DE VENTILACIÓN

La evolución de un incendio en un túnel en el que no exista una ventilación apreciable (natural o forzada) se muestra en la Figura 3. Los humos calientes generados en el incendio tienden a flotar hasta la clave del túnel, arrastrando aire y partículas, y formando una capa o estrato que se va extendiendo longitudinalmente. Al principio esta capa no se mezcla con el resto del aire del túnel, manteniendo la estratificación, pero a medida que se va extendiendo y enfriando, los humos van descendiendo, y son arrastrados hacia el foco del incendio, hasta ocupar todo el volumen del túnel.

Es precisamente la formación de esta capa estratificada la que permite que exista al nivel de la calzada, y durante un cierto tiempo, una zona con visibilidad suficiente para permitir la evacuación del personal de la zona de incendio. La evacuación debe realizarse en todo caso antes de que se destruya esta estratificación, ya que al bajar el humo la

visibilidad es muy limitada, y hace casi imposible que las personas que todavía estén en el túnel encuentren la ruta de escape.

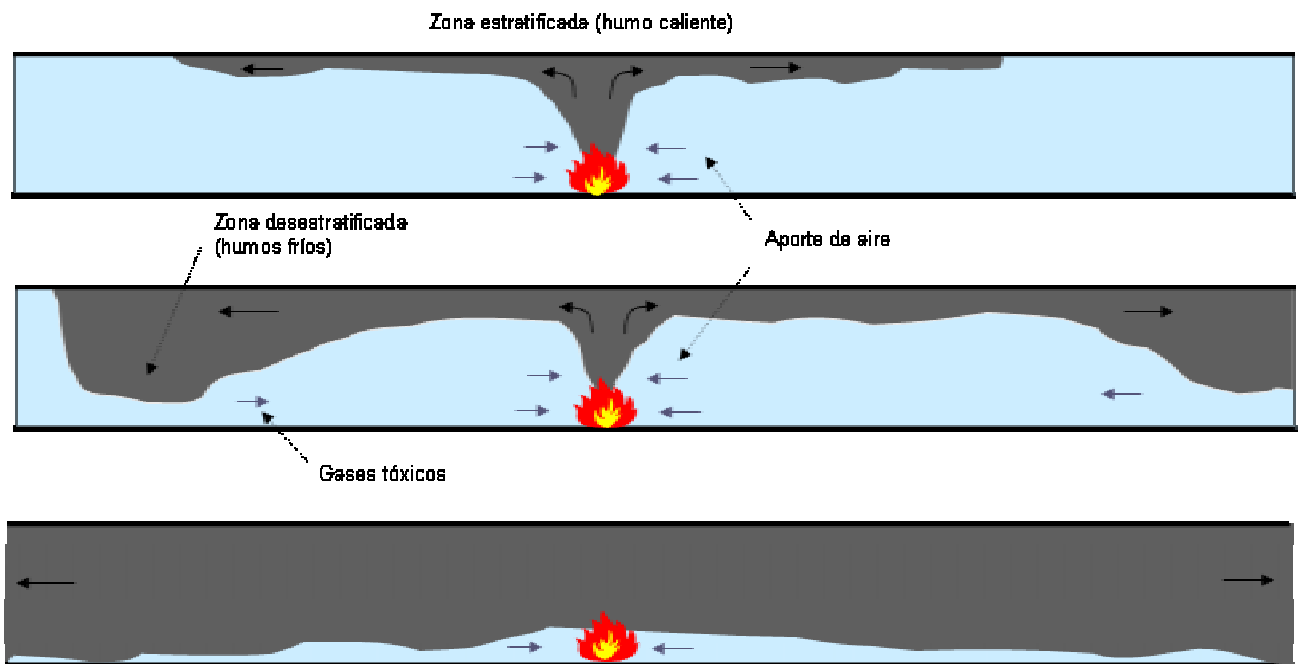


Figura 3: Evolución de un incendio en ausencia de ventilación

La extensión de la capa estratificada, así como su duración, depende tanto de la potencia del incendio como de las dimensiones del túnel. Lógicamente, a mayor sección y altura del túnel más tiempo durará la estratificación. En todo caso, y hablando en términos generales, estamos hablando de distancias del orden de algunos cientos de metros, y tiempos entre 5 y 15 minutos.

VENTILACIÓN LONGITUDINAL

La situación planteada en el apartado anterior es sólo ideal, puesto que normalmente existirá en el túnel una cierta corriente de ventilación, sea natural o forzada. Cuando esta ventilación sea de tipo longitudinal, la corriente de aire tenderá a arrastrar los humos en la dirección del flujo, produciéndose la situación que se muestra en la Figura 4: Aguas abajo del foco del incendio los humos se desestratifican rápidamente por la turbulencia y el enfriamiento provocados por el aire de ventilación, mientras que la zona de entrada del aire se mantiene libre de humos.

Si la velocidad del aire de la ventilación no es suficientemente alta, se produce un fenómeno de retroceso o "backlayer" en la parte alta del túnel, consistente en que los humos avanzan en el sentido contrario a la ventilación, debido al incremento de presión por temperatura en la zona de incendio. La velocidad de aire necesaria para evitar este fenómeno se denomina "velocidad crítica", y su valor depende de las dimensiones del túnel, de su pendiente, y de la potencia del incendio.

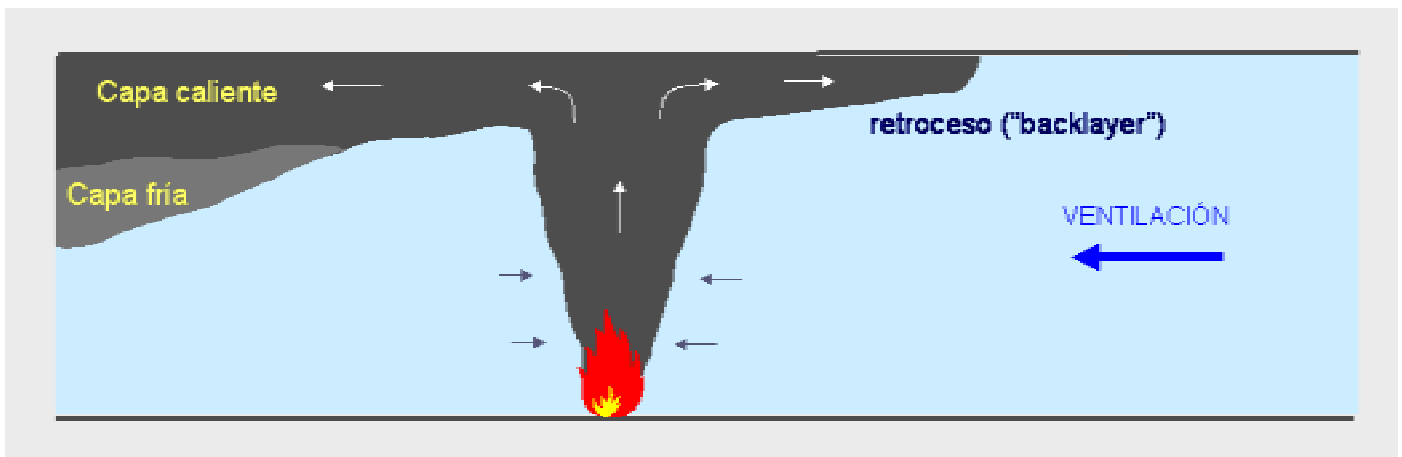


Figura 4: Efecto de la ventilación longitudinal

Existen diversas expresiones para calcular esta velocidad crítica como por ejemplo la propuesta por Kennedy y otros [6]:

$$V_c = K_1 K_2 \left[\frac{g H Q}{\rho C_p A \left(\frac{Q}{\rho C_p A V_c} + T \right)} \right]^{1/3}$$

Donde:

V_c : velocidad crítica (m/s)

K_1 : 0,61 (constante adimensional)

K_2 : constante de corrección por la pendiente del túnel, según

$$K_2 = 1 + 0.0374 s^{0.8} \quad \text{siendo } s \text{ la pendiente del túnel en \%}$$

g : aceleración gravitacional (m/s^2)

H : altura del túnel (m)

Q : potencia del fuego - HRR (W)

ρ : densidad del aire (kg/m^3)

C_p : calor específico del aire (J/kg.K)

A : sección del túnel (m^2)

T : temperatura ambiente (K)

Esta fórmula es bastante aproximada para valores de Q de hasta 50 MW, pero tiende a sobreestimar el valor de V_c para potencias superiores. De hecho el valor de la velocidad crítica, según datos experimentales y resultados de modelos tipo CFD, tiende a estar entre 2 y 3 m/s para potencias de incendio comprendidas respectivamente entre 10 y 100 MW respectivamente, como puede verse en el estudio comparativo realizado por Hwang y Edwards [7], y cuyos resultados se muestran en la Figura 5.

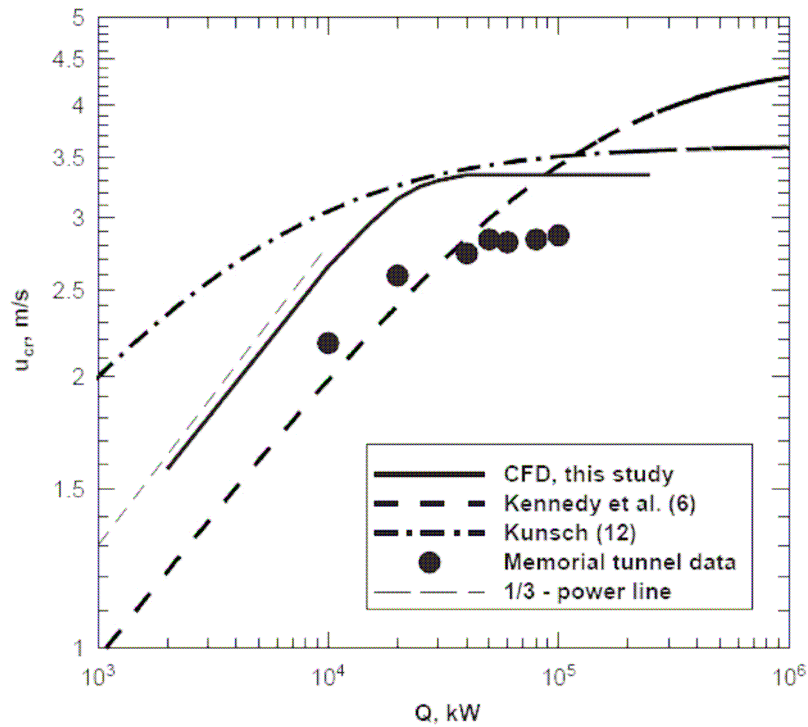


Figura 5: Comparativa de valores de la velocidad crítica según diversos procedimientos de cálculo y con valores experimentales, según Hwang y Edwards [7]

En cualquier caso, y suponiendo que la ventilación longitudinal supera esta velocidad crítica, la evolución de los humos tendrá la forma que se muestra en la Figura 6, donde se observa que los humos son desplazados a lo largo del túnel en el sentido del flujo, creando una atmósfera segura aguas arriba del incendio. Lógicamente, interesa mantener la velocidad del aire de ventilación en valores ligeramente superiores a la crítica, puesto que un exceso de aire sólo conseguirá avivar el fuego y/o facilitar su propagación a otros vehículos que se puedan encontrar en las proximidades.



Figura 6: Evolución de los humos con ventilación longitudinal

Aguas abajo del incendio, los humos se desestratifican rápidamente e invaden enseguida toda la sección del túnel. Esta situación puede ser válida en túneles de tráfico unidireccional, considerando que el tráfico situado aguas abajo del incendio tiene tiempo

de salir del túnel antes de que les alcancen los humos, y que el tráfico detenido antes del incendio se encuentra siempre en una atmósfera segura. Los servicios de extinción intervendrán normalmente por la zona de entrada de la ventilación (Figura 7).

En todo caso, y según dónde se produzca el incendio, una gran parte del túnel puede quedar invadida por el humo, lo que puede ser problemático tanto para la intervención de los bomberos como para el rescate de personas que pudieran haberse resguardado en refugios aguas abajo del incendio, si se da el caso.



Figura 7: Ensayo de incendio en el túnel experimental de San Pedro de Anes, con ventilación longitudinal. La imagen muestra la situación aguas arriba del fuego

El problema es de todos modos mucho mayor si se trata de un túnel bidireccional, ya que el tráfico que entra por una de las bocas se encuentra el humo de frente. En este caso la única solución es detener inmediatamente el tráfico de entrada por dicha boca y mantener la ventilación al nivel más bajo posible para tratar de mantener la estratificación el tiempo necesario para que los vehículos situados dentro del túnel puedan abandonarlo, evitando al mismo tiempo que se produzca una inversión de la ventilación (por ejemplo por efecto chimenea en el caso de túneles en pendiente), ya que ello provocaría la desestratificación de la capa de humos. En todo caso, se trata de una operación muy delicada, sobre todo si el túnel es de cierta longitud, y que deberá hacerse teniendo en cuenta las características del túnel, la posición concreta del incendio, y las condiciones de tráfico y de ventilación en el momento de producirse dicho incendio.

Hay que tener en cuenta también que si la ventilación se consigue mediante ventiladores de chorro, el incendio afectará su rendimiento, ya que el empuje de los ventiladores situados en zonas de alta temperatura bajará por la menor densidad del aire caliente. Si el incendio está muy próximo a ellos, pueden ser destruidos por el fuego (conviene recordar que normalmente están certificados para soportar 400 °C durante dos horas).

VENTILACIÓN TRANSVERSAL Y SEMITRANSVERSAL

Como puede deducirse de lo expuesto en el apartado anterior, la ventilación longitudinal presenta muchos problemas en túneles bidireccionales de cierta longitud, e incluso puede plantear problemas en túneles unidireccionales si son muy largos y tienen una alta densidad de tráfico.

Por el contrario, los sistemas de ventilación transversal y semitransversal permiten realizar una extracción directa de los humos, evitando así que éstos circulen a través del túnel. Aquí es la propia capacidad de extracción del sistema la que se encarga de mantener una zona sin humo en la parte baja del túnel para permitir la evacuación (Figura 8).

Cuando se trata de ventilación transversal, normalmente se cortará la entrada de aire fresco, potenciando al máximo la extracción (Figura 8b), mientras que si la ventilación es semitransversal, se pondrá en modo de extracción (si no lo estuviese ya), también a la máxima potencia (Figura 8c).

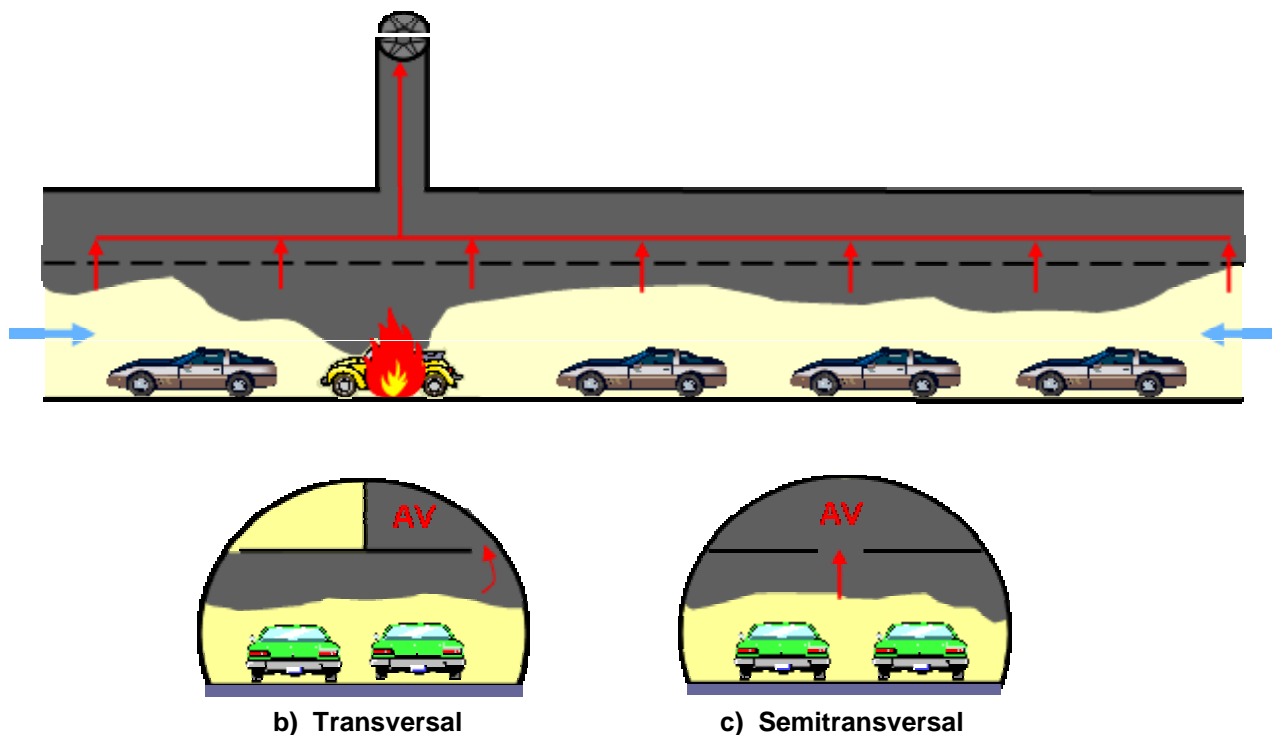


Figura 8: Extracción de humos en sistemas transversal/semitransversal

El sistema de extracción debe tener la capacidad suficiente para extraer todos los humos producidos, manteniendo una zona libre de humos próxima a la calzada del túnel. El sistema debe regularse de manera que el aire fresco entre por las bocas y circule por el túnel siempre en dirección al incendio, para confinar éste y mantener una situación segura en las zonas no afectadas. Esto no siempre es fácil, ya que el efecto de la temperatura y las condiciones atmosféricas pueden tener una gran influencia en algunos casos, sobre todo en túneles relativamente cortos, provocando que incluso con un

sistema potente de extracción, los humos sobrepasen el punto de extracción y se dirijan hacia una de las bocas. Por ejemplo, la nueva normativa suiza y alemana [8, 9] exige que la ventilación a lo largo del túnel desde las dos bocas sea al menos de 1,5 m/s. La solución más utilizada para cumplir esta condición es combinar el sistema de extracción con ventiladores de chorro situados en las bocas, que se regulan en función de las condiciones concretas que se den durante el incendio.

Los túneles largos, por su parte, suelen estar divididos en cantones, existiendo múltiples combinaciones posibles de sistemas de ventilación. La Figura 9 muestra un ejemplo de un túnel dividido en tres cantones, todos ellos con ventilación semitransversal, y con ventiladores reversibles: Durante la operación normal, unas zonas del túnel reciben aire fresco mientras que otras se usan para la extracción de aire viciado, circulando el aire por el túnel entre unas y otras, dentro de un mismo cantón. En caso de incendio, la zona afectada se pone en modo extracción y a la máxima potencia, utilizándose el resto de zonas para inyectar aire fresco del exterior.

Por otra parte, tampoco conviene un exceso de ventilación, por las razones antes apuntadas del posible avivamiento y la propagación del fuego, y también para no romper la capa de estratificada de humos en la zona del incendio. La PIARC recomienda que en la zona del incendio se ajuste la capacidad de extracción al máximo y, si se trata de una ventilación transversal, se corten todos los posibles de aire fresco en dicha zona. En el resto de zonas alejadas del incendio, la entrada de aire fresco debe mantenerse entre 1/2 y 1/3 de la capacidad máxima, de manera que la velocidad longitudinal provocada en el túnel no supere los 2 m/s [10].

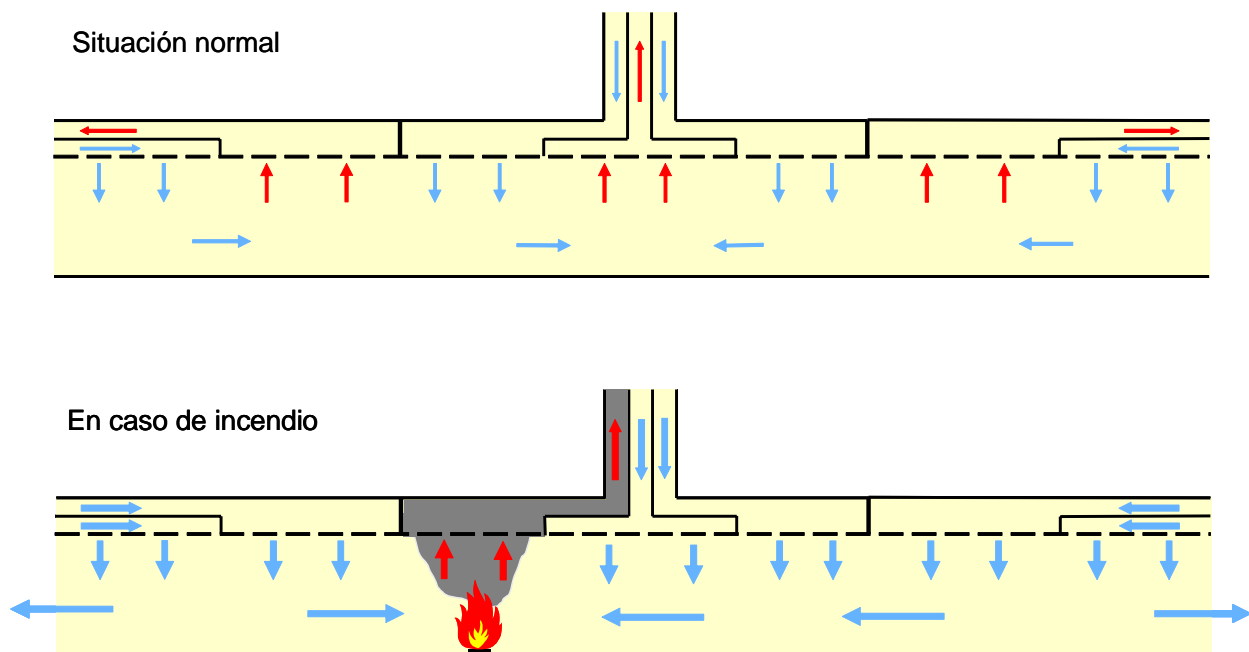


Figura 9: Ejemplo de túnel dividido en cantones con ventilación semitransversal

CONCLUSIONES

La ventilación es uno de los elementos principales de lucha contra los incendios en los túneles, y es la herramienta fundamental para poder crear un entorno seguro el tiempo suficiente para proceder a la evacuación del túnel, y para facilitar posteriormente la intervención de los equipos de extinción.

Todos los sistemas de ventilación (longitudinal, transversal y semitransversal), son válidos para esta función, si se diseñan y se operan adecuadamente. También es fundamental una correcta regulación de la ventilación en caso de incendio, ya que un exceso de aire puede tener efectos contraproducentes como son al avivamiento del fuego, o su propagación hacia nuevos focos.

El sistema de ventilación debe diseñarse específicamente para cada túnel en función de sus características geométricas, disposición, y tipo y densidad de tráfico, y de un análisis de riesgos que tenga en cuenta todos esos parámetros.

REFERENCIAS

- 1 Cheyrezy M., Khoury G.A., Behloul, M. (2001) "Mechanical properties of four high-performance concretes in compression at high temperatures". *Revue Francaise de genie Civil*. Vol. 5 no.8
- 2 Khoury, G.A. (2002) "Passive protection against fire" *Tunnels and Tunelling*. Vol. 34, no.11. pp 40-42
- 3 Romana, M. (2005) "El comportamiento del hormigón de los túneles frente al fuego". IV Simposio de Túneles, Andorra 26-28 de noviembre.
- 4 Lacroix, D. (1998) "Fire and smoke control in road tunnels". PIARC, *Routes/Roads*. No.300. pp 33-43
- 5 Carvel, R. y Berad, A. (2005) The influence of tunnel ventilation on fire behaviour. *The handbook of tunnel fire safety*. pp184-198. Thomas Telford Ltd. London.
- 6 Kennedy W.D., Gonzales J.A., Sanchez J.G. (1996) "Derivation and application of the SES critical velocity equations". *ASHRAE Trans: Research*. 102(2):40-4
- 7 Hwang, C.C., Edwards, J.C. (2005) "The critical ventilation velocity in tunnel fires - a computer simulation". *Fire Safety Journal* vol 40 n° 3. pp 213-244
- 8 ASTRA - Bundesamt für Strassen. Richtlinie Lüftung der Strassentunneln. Draft version 19. 2003
- 9 RABT-2003 Richtlinien für die Ausstattung un den Betrieb von Strassentunneln. 2003
- 10 World Road Association. "Fire and smoke control in tunnels" PIARC Committee on Road Tunnels (C5), 1999