



Una vista de conjunto sobre el problema de la seguridad frente a incendios en túneles

A general view on the safety problems in tunnels fires

Manuel Romana Ruiz
Universidad Politécnica de Valencia
Miembro del Comité de Túneles de ATC
y del correspondiente de PIARC

Resumen

Se repasa, de una manera general, el problema de los incendios en túneles: riesgo para las personas en los diferentes tipos de túneles (carretera, ferrocarriles, metros); causas, frecuencia y magnitud de los incendios; y daños a la infraestructura del túnel (resistencia del hormigón al fuego).

Este artículo es, con algunas correcciones y añadidos, la ponencia de introducción presentada en la sesión sobre "Incendios en túneles", organizada por la Cátedra Universidad - Empresa Paymacotas con la colaboración de STMR, en la Universidad Politécnica de Cataluña, el 5 de mayo de 2011 (1). Este artículo ha sido aprobado por el Comité de Túneles de ATC para su publicación en la revista Rutas.

PALABRAS CLAVE: Túnel, fuego, carreteras, ferrocarriles, metros, hormigón.

Abstract

The paper gives a general view on the safety problems in tunnel fires: risks for the users in the different kind of tunnels (roads, railways, subways); origins, frequency and magnitude of fires; and damages to the tunnel infrastructures (concrete loss of strength during the fire).

A substantial part of the paper was presented at the session on "Fires in Tunnels" held at the Technical University of Barcelona on May 15, 2011 [1].

KEY WORDS: Key Words: Tunnel, fire, roads, railways, subways, concrete.

Presentación

El Comité internacional de túneles de la AIPCR viene trabajando desde hace muchos años, incluso antes de acontecer los graves accidentes en los túneles alpinos en los años 1999 y 2000, en el estudio, evolución y consecuencias de los incendios en túneles de carretera. Así que ya en el ciclo 1996 – 1999 se elaboraron sendos informes relativos a “Túneles de Carretera: Emisiones, Ventilación y Medio Ambiente” (1999), “Control del fuego y del humo en túneles de carretera” (1999), y “Polución derivada del Dióxido de Nitrógeno en túneles de carretera” (2000), habiéndose publicado varios más hasta la actualidad.

En esta misma línea se ha venido trabajando en el Comité nacional de la Asociación Técnica de Carreteras que ha prestado apoyo al Comité internacional, participando activamente en los grupos de trabajo que redactaron los informes citados y colaborando en su divulgación.

Siguiendo con este objetivo y en esta ocasión además en el marco del aula PaymaCotas, Manuel Romana Ruiz, miembro de los Comités nacional e internacional y presidente del nacional en el periodo 1984 – 1999, impartió en mayo de 2011 la ponencia “Incendios en túneles. Una visión de conjunto”, que por su interés se ha considerado oportuno dar a conocer a los lectores de la Revista Rutas, destacando, como consecuencia de los nuevos conocimientos, estudios e investigación, nueva normativa, esfuerzo inversor y revisión de las experiencias, la desigual situación en la que se encontraban los túneles tan sólo hace unas décadas y el cambio de rumbo producido como reacción a los importantes incendios acontecidos.

Rafael López Guarga

Presidente del Comité nacional de túneles de la ATC

1. Introducción

El tema de los incendios en túneles evoca en nuestra mente cierto sentimiento de aprensión, o incluso de terror. Es un miedo algo irracional: si nos imaginamos próximos al fuego esa situación nos inquieta mucho y nos asusta. Es normal, y deseable, ese sentimiento de miedo (aunque sea irracional), porque es un mecanismo de defensa en nuestra vida diaria. Pero si, como es nuestra tarea de hoy, debemos analizar un problema como ingenieros debemos obviar los miedos irracionales y mantener la mente fría, para tratar de realizar un análisis lo más objetivo posible.

Un ejemplo claro de la existencia de esos miedos en la imaginación colectiva es el tratamiento que los medios de comunicación dan a los incendios en los túneles. Son noticia destacada, de portada, aunque el problema haya sido nimio. Un ejemplo reciente: según La Nueva España (periódico de Oviedo, edición del 21 de abril de 2011) “el humo de una barricada con neumáticos ardiendo causó la intoxicación de cuatro personas en los túneles de Riaño”. Leído así, la noticia no parece ofrecer dudas: alguien colocó una barricada en un túnel, provocó un incendio e intoxicó a cuatro personas.

No fue exactamente así y la noticia, correctamente planteada, pudo leerse en el diario digital AsturGalicia (<http://asturgalicia.wordpress.com/2011/04/20/>). Existió realmente la barricada, colocada por los trabajadores de la empresa Alas Aluminion en señal de protesta porque, si no se encuentra una solución económica o un comprador, la empresa va a ser cerrada. Pero la barrica-

da no estaba en un túnel. Los túneles de Riaño son dos (uno muy corto, de 125 m; y otro más largo, de 750 m) y están bastante próximos entre sí; constituyen el último tramo de la carretera autonómica AS-16 antes de su entrada en La Felguera. Con objeto de asegurar el corte de tráfico, sin posibles desvíos, los obreros colocaron la barricada entre los dos túneles y un golpe de viento hizo que parte del humo entrara en el túnel corto. Los conductores bloqueados se asustaron, salieron de sus coches y camiones y se quejaron del efecto del humo. Parece claro que en un túnel de 125 m de largo el escape es inmediato y es difícil intoxicarse. La noticia publicada por La Nueva España es, por lo menos, muy exagerada.

Por otra parte cuando hablamos de incendios en túneles evocamos automáticamente los túneles de carretera, porque solemos tener una experiencia más directa

de ellos, debida a que los atravesamos frecuentemente en nuestros vehículos. Este efecto es también muy general entre los políticos que establecen regulaciones de todo tipo. La Unión Europea dictó la “**Directiva 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 29 de abril de 2004 sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras**”, mucho antes de ocuparse de los túneles ferroviarios o de metro.

Y sin embargo los incendios en túneles de carretera han sido, y son, mucho menos peligrosos que los incendios en túneles ferroviarios o de metro, como puede comprobarse en la *tabla 1* en la que se reseñan los incendios en túneles con más mortalidad en los últimos cuarenta años. Es lógico que así sea porque los vehículos ferroviarios llevan muchos más pasajeros que los vehículos carreteros, y, además, su escape está con-

Tabla 1. Incendios con más mortalidad en túneles en los últimos cuarenta años

Año	Lugar	País	Tipo de túnel	Muertos	Heridos
1971	Vranduk	Bosnia	Carretera	34	Sin datos
1972	Fukui	Japón	Ferroviario	29	Sin datos
1979	Nihonzaka	Japón	Carretera	7	2
1987	Londres	Reino Unido	Metro	31	~150
1993	Vega de Anzo (Asturias)	España	Ferroviario FEVE	12	7
1995	Baku	Azerbaiyán	Metro	289	256
1999	Mont Blanc	Francia/Italia	Carretera	39	34
1999	Tauern	Austria	Autopista	12	49
2000	Kaprun	Austria	Funicular	155	Ninguno
2001	S. Gotardo	Suiza	Carretera	11	19
2003	Daegu	Corea del S.	Metro	~130	~140
2006	Viamala	Suiza	Carretera	9	Sin datos

Nota. - Algunas cifras de muertos y heridos son aproximadas por falta de información final sobre las consecuencias médicas (a largo plazo) de los accidentes.



Figura 1. El túnel Nihonzaka después del incendio (Mashimo y Mizutani, 2003)

dicionado por las acciones de los agentes de tráfico que pueden ser muy erróneas (por ejemplo, la mayoría de los muertos en el incendio del metro de Baku se produjeron porque se cortó el tráfico, deteniendo un convoy repleto de viajeros dentro del túnel a unos 200 metros de otro convoy, ya evacuado, que ardía en una estación; los pasajeros del convoy detenido en el interior del túnel perecieron asfixiados).

En los túneles de carretera es más factible el auto-rescate de los viajeros atrapados en el incendio y, por esa razón, los túneles más modernos de carretera (y los ferroviarios de alta velocidad) tienen galerías de escape con la finalidad de facilitar ese auto-rescate.

El incendio de 1979 en el túnel de Nihonzaka destruyó 173 vehículos y no pudo ser apagado más que después de 11 días [2]. Fue, por lo tanto, el primer incendio importante en túneles de carretera. Véase el aspecto del túnel en la figura 1.

Los japoneses aceptaron la lección, construyeron un túnel experimental para ensayos de incendios, y establecieron, experimentalmente y por primera vez, los principios básicos de la circulación del humo en un túnel. En Europa el incendio del túnel de Nihonzaka pareció “*distinto y distante*” y no se le prestó demasiada atención. Se pensaba que un desastre de ese calibre no podía suceder en la Europa de finales del siglo XX.

Pero sucedió. En abril de 1999 ardió la carga de margarina de un camión en el túnel del MontBlanc, murieron asfixiadas 39 personas, y el incendio duró 53 horas (prácticamente se extinguió solo). El túnel estuvo cerrado tres años por problemas jurídicos y administrativos y para una remodelación completa. Y en mayo del mismo año, un semáforo de obra en el interior del túnel del Tauern provocó un choque múltiple de dos camiones y tres coches, seguido de incendio.

Murieron 12 personas, el incendio fue apagado por los bomberos en 15 horas y la reconstrucción del tramo dañado duró tres meses.

La conmoción causada en Europa por estos accidentes fue enorme. Y para remarcarla, en octubre de 2001 un choque frontal entre dos camiones provocó un incendio en el túnel de San Gotardo con 8 muertos (los usuarios dentro del túnel que no atinaron a salir por las galerías de evacuación existentes; el saldo de muertos habría sido mucho mayor si una gran cantidad de automovilistas no hubiera escapado por ellas).

Y la Comisión Europea se puso a trabajar y propuso su directiva, que fue aprobada por el Parlamento Europeo, en su última sesión antes de las elecciones de 2004, espoleado por la entonces Comisaria de Transportes, Loyola de Palacio (†). Antes de dos años, el Ministerio de Fomento la traspuso para todas las carreteras, autopistas y autovías de la Red de interés general del Estado Español.

La reflexión de Francisco Palazón Rubio (experto en ITS) en 2003 sigue siendo válida: “*En la Europa Comunitaria mueren anualmente unas 40 000 personas en accidentes de circulación. Los siniestros del túnel del Mont Blanc, Tauern y San Gotardo produjeron, en casi cuatro años, 60 víctimas mortales. Debido a la alarma social causada por estos siniestros, se han hecho, para mejorar la seguridad en túneles, esfuerzos comparables a los destinados a combatir la siniestralidad regular de más de 150 000 muertos en este mismo período de tiempo en las carreteras europeas*” [3].

¿Cuál es la razón de esta desproporción de esfuerzos? Aparentemente sólo hay una: la Unión Europea (y su brazo ejecutivo que es la Comisión) se mueve teniendo más en cuenta las percepciones de la sociedad europea que los hechos objetivos. Si la sociedad, azuzada por los medios de comunicación, está preocupada por la seguridad en túneles de carretera la Unión Europea legisla en ese sentido, sin tener en cuenta la eficacia real, en términos de muertes evitadas, de las medidas legisladas. Cualquier muerte es lamentable y deben hacerse todos los esfuerzos posibles para evitarla. Pero la sociedad valora más unas muertes, las que le asustan, que otras. Con este rasero: un muerto en el incendio de un túnel “vale” más que otros mil

en accidentes de tráfico fuera de ellos.

En lo que sigue repasaremos, a vista de pájaro, algunas de las cuestiones planteadas por los incendios en los túneles, tratando más de fijar conceptos (y órdenes de magnitud) que de realizar un estudio científico detallado de dichas cuestiones.

2. Causas de los incendios

En los túneles ferroviarios y de metro la causa de casi todos los incendios es un fuego eléctrico, que se suele iniciar dentro de un vagón debido a defectos de funcionamiento en instalaciones secundarias. Por ejemplo, el incendio del funicular de Kaprun (en Austria) se debió al sobrecalentamiento producido en un pequeño calefactor eléctrico instalado, fuera del diseño original, en la cabina de los conductores, a petición de ellos; y el fuego del ferrocarril en el túnel Fukui se inició en una pequeña cocina eléctrica del coche restaurante. Otras veces el fuego se inicia a partir de problemas de suministro eléctrico en la catenaria.

Un descarrilamiento puede ocasionar un fuego en trenes con mercancías inflamables (como, por ejemplo, en Baltimore: en 2001 un vagón de un tren de mercancías cargado con combustibles descarriló en el interior del túnel de Howard Street causando un monumental incendio que perturbó la vida urbana pero no produjo víctimas).

Finalmente, en líneas de vía única, el choque de trenes dentro de un túnel es un accidente terrible, que puede causar un incendio posterior. Así fue el accidente en el túnel de FEVE de Vega de Anzo (Asturias), en 1993. No es posible deslindar la causa de la muerte de las víctimas: el choque o el incendio posterior.

En los túneles carreteros la mayoría de los incendios son causados por fugas de combustible en los motores, combinadas con sobrecalentamientos o problemas del circuito eléctrico. Generalmente arde un solo vehículo, que en ocasiones entra ardiendo en el túnel; el fuego puede ser controlado por los equipos de explotación del túnel (que a veces tienen su propio equipo automóvil de extinción, como en el túnel de Guadarrama en la AP-6) o por los propios usuarios. Se utilizan mucho los dispositivos de extinción fijos y disponibles en el túnel: extintores portátiles, bocas de incendio equipadas, etc.

El incendio no tiene consecuencias graves. Arde un solo vehículo y el fuego dura minutos. El daño a la infraestructura del túnel suele ser mínimo y la circulación se reanuda en un par de horas como máximo.

Por citar un solo túnel, bien conocido, en el túnel del Montblanc se habían producido 17 incendios de vehículos pesados desde que se abrió al tráfico en 1965 hasta el incendio de 1999. Fueron controlados, con relativa facilidad, con extintores portátiles o por la acción de los bomberos (franceses o italianos). La causa alegada con más frecuencia fue el sobrecalentamiento de los motores, debido a las rampas de acceso. Ninguno de los incendios causó víctimas mortales ni daños graves a la infraestructura del túnel.

Algunas veces la carga de un camión empieza a arder antes de la entrada en el túnel. Así ocurrió en el primer incendio en el 2º Túnel de Guadarrama (un camión cargado con resina) y parece que también en el incendio de 1999 en el Túnel del MontBlanc (un remolque lleno de margarina). Es curioso que estas cargas y otras similares (como la madera) no estén clasificadas como mercancías peligrosas, y ciertamente en otros sentidos no lo son; pero son combustibles fáciles. El fuego dura bastante tiempo (varias horas), es difícil de extinguir y la circulación se interrumpe un largo tiempo. El daño a la infraestructura del túnel depende de su vulnerabilidad y puede ser grave: en túneles con ventilación transversal o semitransversal parte del forjado superior de separación de aire se destruye.

Pero en los incendios graves, con víctimas, en túneles de carretera, autopista o autovía, la causa suele ser un accidente de tráfico previo. Así ocurrió en 13 de los 15 incendios más desastrosos en túneles de carretera. Generalmente arden varios vehículos, el fuego dura de varias horas a algunos días y es muy difícil de controlar por los bomberos, si es que llegan a tiempo y en condiciones de luchar contra el incendio.

Se sabe que en el interior de los túneles la seguridad vial es mayor que en el resto de la red. Aunque es difícil cuantificar la mejora puede estimarse que la probabilidad de un accidente de tráfico dentro de un túnel es bastante menor que fuera. En la red española la siniestralidad vial en el interior de los túneles es del orden de 1/3 a 1/6 de la exterior.

Además, muchos accidentes se localizan en las inmediaciones de las bocas y pocos en el interior, lo que facilita la evacuación directa.

3. Frecuencia de los incendios

Hay una casi total falta de datos estadísticos completos sobre la frecuencia de incendios en túneles de carretera. Pero pueden hacerse algunas estimaciones:

- La frecuencia es siempre inferior a 25 por cada 10⁸ vehículos-kilómetro.
- A finales del siglo pasado la frecuencia en los túneles franceses variaba entre 0 y 10 por 10⁸ vehículos-kilómetro.
- La frecuencia es mayor (del orden de un incendio/mes a un incendio/año) en:
 - Túneles urbanos.
 - Túneles largos con muchos vehículos pesados.
 - Túneles de montaña con largas rampas de acceso.
- En un 40% de los túneles nunca hubo un fuego.

Estas frecuencias son muy bajas. Los incendios en túneles de carretera, con varias víctimas mortales, son realmente escasos (la *tabla 1* reseña 6 incendios en todo el mundo, durante los últimos 40 años).

4. Riesgos para la vida humana

El primer riesgo es el calor, ya sea dentro del incendio, ya sea en sus proximidades. El hombre no puede soportar temperaturas del aire del orden de 80° ni radiación de calor mayor de 2,5 kW/m². Los bomberos bien equipados con equipos ignífugos sólo pueden trabajar con radiaciones inferiores a 5 kW/m², lo que les impide, en muchos casos, acercarse a un fuego bien desarrollado para combatirlo.

El segundo riesgo, mucho más frecuen-

te, es la asfixia por inhalación de humos con gases tóxicos (CO, NO, HCN, HCl...) producidos por la ignición. La inmensa mayoría de las víctimas mortales lo son a causa del humo. Y el problema se agrava mucho por la falta de visibilidad. Por eso una ventilación bien diseñada y bien manejada es la principal herramienta para salvar vidas dentro de un túnel en el que arde un incendio. Y, conjuntamente, debe dotarse a los túneles de galerías de escape para facilitar el auto-rescate de los afectados en el plazo de tiempo más breve posible (por dar un número, durante los primeros 8-10 minutos desde el inicio del fuego).

El tercer riesgo es la caída de partes de la infraestructura del túnel construidas con hormigón u otros materiales ligeros. Los forjados para ventilación y las placas ligeras sobrepuestas a los hastiales de túnel son dañados por el incendio y pueden ocasionar víctimas. Pero eso no ocurre en los primeros minutos, porque debe llegarse a los 300-400° para que comiencen las caídas. Los bomberos son quienes corren este riesgo.

El cuarto riesgo sería el "spalling", o desconchado de las paredes de hormigón del túnel. El "spalling" se produce en gran cantidad de incendios y se supone que puede ser peligroso para las personas. Pero no conozco ningún caso de alegación de daños producidos por "spalling".

5. Magnitud de los incendios

Se han realizado muchos incendios experimentales en túneles para estudiar sus características. Los experimentos anteriores a 1995 (recogidos en la *tabla 2*) fijaron las características de diseño de incendios que aún se usan.

Una definición simplificada de la magnitud de los incendios se recoge en la *tabla 3*, deducida de los ensayos del proyecto

Tabla 2. Algunos incendios experimentales anteriores a 1995

Lugar	País	Fecha	Observaciones
Offeneg	Suiza	1965	
Zwenberg	Austria	1974-5	
PWRI	Japón	1980	Túnel artificial construido ex profeso
Runnehamar*	Noruega	1990-2	Proyecto EUREKA FIRETUN de la Unión Europea
Memorial Túnel*	Virginia (EE.UU.)	1993-5	Proyecto de la FHWA y Parsons para la Central Artery en Boston

(*) Túneles fuera de servicio, acondicionados para ensayos sistemáticos de incendios

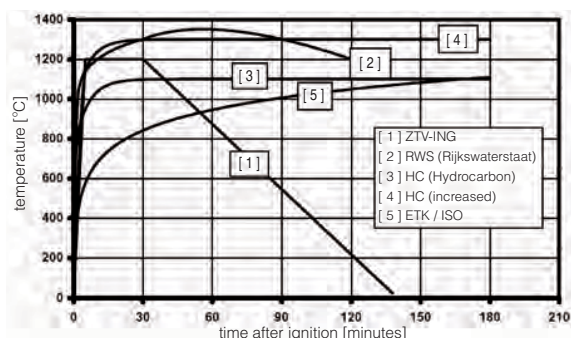


Figura 2. Curvas de fuego utilizadas en Europa [4]

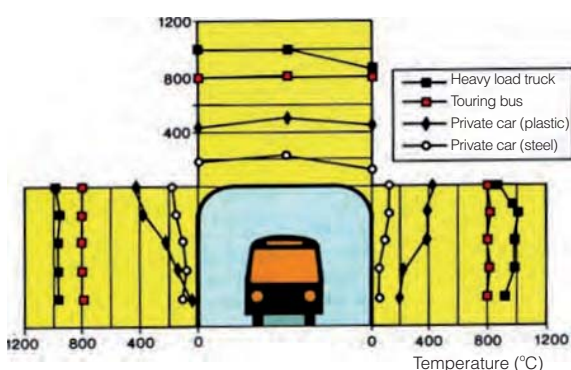


Figura 3. Temperaturas en las paredes del túnel durante los ensayos EUREKA [6]

EUREKA. Existen otras tabulaciones, utilizadas en las normativas de diferentes países, pero no son muy diferentes de las definidas en la *tabla 3*.

En España, el incendio de diseño generalmente adoptado para túneles de carretera es de una potencia de fuego de 30 MW, lo que excluye las cisternas cargadas con mercancías peligrosas o explosivas (como

La discusión sobre si las mercancías peligrosas deben evitar el paso por túneles es muy compleja y cae fuera del ámbito de este artículo generalista. Una posición adoptada a veces por las autoridades de tráfico es que un posible accidente explosivo (BLEVE en la jerga técnica) puede presentar menos riesgos para la población en un túnel que en un entorno urbano o urbanizado.

La decisión de autorizar un túnel para el paso de mercancías peligrosas es difícil y requiere análisis complejos de riesgos.

Las llamadas “curvas de fuego” están normalizadas y relacionan la temperatura alcanzada en el interior del fuego con el tiempo desde su comienzo. La *figura 2* (tomada de Hack y otros, [4]) las resume. Son las siguientes:

1. ZTV/ING, utilizada en los ferrocarriles alemanes.
2. RWS, holandesa Su temperatura máxima es 1 350°.
3. HC, hidrocarburos, una curva empírica desarrollada para la previsión de incendios en las refinerías de petróleo. Su temperatura máxima es 1 100°.
4. HC incrementada, obtenida multiplicando por 13/11 las ordenadas de la curva HC. Su temperatura máxima es 1 300°.
5. ETK/ISO, normalizada para incendios de material celulósico (por ejemplo, muebles) y que es la más utilizada en edificación (es normativa en España).

El criterio conjunto propuesto por ITA-PIARC [5] es utilizar la curva 4 (HC incrementada) cuando el riesgo de rotura del revestimiento sea catastrófico (por ejemplo, en túneles subacuáticos o en túneles urbanos muy someros) o para proteger equipamientos vitales y la curva 5 (ISO) en los demás casos.

Examinando estas curvas se aprecia que todas (menos la 1) presuponen un periodo largo de incendio a temperatura máxima, lo que no parece demostrado en los incendios experimentales. En todas ellas la temperatura aumenta muy rápidamente en los primeros minutos del fuego, lo que sí parece confirmado en todos los incendios experimentales. En 10 minutos o menos se alcanza la temperatura máxima. Esa es la razón por la que la cualidad más necesaria

Tabla 3. Magnitud de los incendios medida en el proyecto EUREKA

Tipo de vehículo	Carga (GJ)	Potencia (MW)	Observaciones
Turismo	6	4	EUREKA
Microbús	7	4,5	EUREKA
Autobús	41	20	EUREKA
Remolque TIR	65	20-30	EUREKA
Camión pesado	88	30	EUREKA
Cisterna de 50 m³ de gasolina	1 500	300	Estimación holandesa



Figura 4. Daños en el túnel del Negrón después del incendio de un camión en 2008 (Palazón y López, 2010)

en la respuesta al incendio sea la rapidez. Tanto la de identificación y localización, como la de asistencia a los usuarios afectados y la de auto-rescate. Para alcanzar esa rapidez los sistemas y las personas deben estar bien probados y entrenados. Los sistemas automáticos de detección y guía de la respuesta son una ayuda necesaria, aunque hay opiniones diversas sobre si necesitan o no un ajuste y supervisión humanos.

Pero hay que hacer notar que se trata de temperaturas en el foco del incendio. En el humo son menores (del orden de 200°-400°) y en los paramentos del túnel también (del orden de 200°-400° para incendios de coches y de 800°-1 000° para incendios de vehículos pesados, ver figura 3). Además disminuyen rápidamente al alejarse unas decenas de metros del foco y varían según la dirección del incendio: a barlovento de él son menores, efecto que se utiliza cuando se controla el incendio mediante ventilación longitudinal.

La diferencia de temperaturas durante el incendio explica que los incendios de automóviles rara vez causen daños importantes, a diferencia de los incendios de vehículos pesados.

Los caudales de humo supuestos para el cálculo de la ventilación son altos: del orden de 50 m³/s para el incendio de una furgoneta y de 80 m³/s para el de un camión (normativa del CETU francés).

6. Daños a la infraestructura del túnel

Hay que considerar tres tipos de daños posibles [7]:

- A las instalaciones y equipamientos de los túneles en la zona del incendio si no están especialmente protegidas.
- A la infraestructura "civil" complementaria (forjados, aceras, placas de revestimiento que no sean ignífugas...).
- A la infraestructura "civil" básica del túnel: el conjunto sostenimiento-revestimiento.

Pero el túnel no "arde". No hay precedentes de que un incendio produzca la destrucción total o parcial de túneles excavados en mina.

Las instalaciones y equipamientos pueden dañarse si son afectados directamente por las llamas o por los humos calientes



Figura 5. Elementos de la infraestructura del túnel de San Gotardo caídos después del incendio de 2001

(por ejemplo los ventiladores pierden potencia con el calentamiento del humo). La figura 4 [8] muestra daños en el túnel del Negrón en la autopista A-66 después de un incendio en 2008.

El incendio puede afectar a la infraestructura "civil" complementaria. Las uniones de estos elementos con el sostenimiento-revestimiento del túnel suelen fallar si no están especialmente protegidas, y las caídas presentan un riesgo adicional para los usuarios del túnel y para los miembros de las brigadas de bomberos. La figura 5 muestra diversos elementos caídos en el túnel de San Gotardo después del incendio de 2001.

La reconstrucción es compleja y obliga a cerrar el túnel por periodos largos. Por ejemplo en el túnel del Tauern se destruyó un gran tramo del forjado superior de ventilación, porque estaba apoyado en ménsulas del revestimiento construidas con hormigón sin armar. Su reconstrucción con elementos prefabricados se hizo en un tiempo récord de 3 meses.

El hormigón es un elemento que aguantaba bastante bien los efectos del fuego. En términos generales su resistencia a compresión simple permanece más o menos constante hasta una temperatura de 300°, para disminuir después paulatinamente hasta anularse a unos 800° (véase la figura 6 [9]). Pero el efecto es distinto para cada clase de hormigón. Por lo tanto, su fusión está descartada en prácticamente todos los incendios, aunque puede suceder en incendios de cisternas de mercancías peligrosas (BLEVE en la terminología técnica).

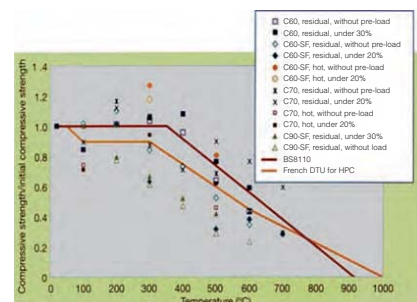


Figura 6. Pérdida de la resistencia a compresión del hormigón con el aumento de la temperatura (Cheirezy et al, 2001)

La resistencia a tracción del hormigón, y la de las armaduras de acero, se pierde antes, alrededor de los 300°. Por lo tanto, los incendios serán especialmente peligrosos en los túneles construidos en zanja con pantallas, y losa de cubierta y en los túneles subacuáticos de elementos prefabricados de hormigón armado. Esa es la razón por la que Holanda (con numerosos túneles bajo canales o nivel freático) tiene el reglamento antifuego más estricto entre los países de la Unión Europea.

La protección de las armaduras contra los efectos del incendio está bien definida en los Eurocódigos y debe hacerse aumentando su recubrimiento. Pero el hormigón sin armar sufre muy pocos daños estructurales como se demostró en el incendio del túnel del MontBlanc.

El riesgo más frecuente para el hormigón es el "spalling", término que podría traducirse por "lajeo" o, más castizamente, "desconchado". Su causa es la vaporización del agua contenida en los poros del hormigón, con efectos explosivos sobre la



Figura 7. Daños en las dovelas del túnel de La Mancha después del incendio de 1996



Figura 8. Daños por "spalling" en las dovelas del túnel de la Mancha después del incendio de 1996

zona más superficial. El ejemplo clásico de "spalling" son los daños en las dovelas de hormigón de alta resistencia del revestimiento circular del túnel de la Mancha durante el prolongado incendio de 1996 (figura 7). Se destruyó una parte apreciable del espesor de las dovelas y las armaduras quedaron al descubierto. Pero el túnel aguantó sin deformaciones. Tampoco aumentaron las filtraciones. La reparación se realizó con hormigón proyectado armado con fibras metálicas.

La protección contra el "spalling" puede hacerse de muy diversas maneras.

- Aumentando el espesor del recubrimiento de las armaduras.
- Incluyendo en el hormigón fibras de polipropileno.
- Mediante la aplicación superficial de morteros ignífugos.

En los túneles modernos es normal la utilización de alguna, o de varias, de esas medidas de protección del hormigón.

7. Resumen y conclusiones

La experiencia de los últimos 40 años muestra que hay relativamente muy pocos accidentes graves, con víctimas mortales,

debidos a incendios en túneles. La gravedad y el número de víctimas son mayores en túneles ferroviarios o de metro que en túneles de carretera. Sin embargo, los incendios provocan un gran miedo en el subconsciente colectivo, miedo que se refleja en el llamativo tratamiento que los medios de comunicación dan a los incendios (reales o supuestos) en túneles. Los políticos reaccionan consecuentemente.

Tras una serie de tres incendios seguidos en túneles alpinos, la Unión Europea dictó la Directiva sobre seguridad en los túneles de red viaria transeuropea, que se aplica actualmente en todos los países miembros, y está muy orientada a permitir el auto-rescate de los usuarios durante un incendio.

La causa más frecuente de incendios en túneles ferroviarios es el fuego eléctrico en una instalación eléctrica menor; mientras que en carretera es el fuego por calentamiento del motor. Sin embargo, los accidentes en túneles de carretera con más número de víctimas son incendios tras una colisión entre vehículos.

Tras una serie de incendios experimentales hay un consenso general en la magnitud de los incendios en túneles de carretera (recogido en la tabla 3) que se utiliza actualmente como base para los estudios y proyectos. Hay también un consenso sobre las curvas de fuego que deben aplicarse (figura 2), aunque con matices diferentes según las condiciones predominantes en cada país.

Los mayores riesgos para las personas los produce el humo. Por esa razón, una ventilación adecuada, en caso de incendio, es una premisa importante de la seguridad.

El incendio puede dañar al túnel destruyendo elementos de sus instalaciones, derribando elementos auxiliares de infraestructura civil (forjados, placas de revestimiento) o dañando el revestimiento de hormigón de los túneles en mina, que no se destruye por completo, sino que disminuye su espesor a causa del "spalling". En los túneles en trinchera hay riesgo de rotura de los elementos estructurales que trabajen a flexión (losas, puntales) por daños en las armaduras.

El riesgo de "spalling" se previene con facilidad aumentando los espesores de revestimientos de las armaduras o adicionando al hormigón fibras de polipropileno.

Y una conclusión general: el riesgo de muerte por incendio en un túnel de carretera

es muchísimo menor que el riesgo de muerte por otro tipo de accidente de circulación.

8. Referencias

- [1] ALONSO, E.; ARROYO, M. & ROMANA, M. (editores) "Incendios en túneles". Cátedra Payma-Cotas. Universidad Politécnica de Cataluña. 2011.
- [2] MASHIMO, H. & MIZUTANI, T. "Current state of road tunnel safety in Japan". Japan Public Works. Research Institute and Advanced Construction Technology Center. 2003.
- [3] PALAZÓN, F. "Lecciones aprendidas en la elaboración de Manuales de Explotación". Jornada sobre seguridad en la explotación de túneles (STMR). 2003. No publicado.
- [4] HAACK A.; BENDELIUS; BOTH; CORSI; FOIT; GABAY; GALEA; HEJNY; HÖRHAN; INGASON; KUMAR; LACROIX & MARLAIR. "Design Fire Scenarios". Borrador no publicado. Comité de Túneles de PIARC. 2004.
- [5] ITA "Guidelines for structural fire resistance for road tunnels". Preparado en colaboración por el WG 6 de ITA y el Comité de Túneles de PIARC. 2005. Puede descargarse de www.ita-aites.org en WorkingGroupsPublications/WG6
- [6] RICHTER, E. "Propagation and developments of temperature from tests with railway and road vehicles". Proc. Int. conf. on fire in tunnels. Borås, Sweden. 1994. Pp.51-62.
- [7] ROMANA, M. "Ponencia sobre incendios en túneles". Jornada sobre seguridad en la explotación de túneles (STMR) 2003. No publicado.
- [8] PALAZÓN, F. & LÓPEZ, M. "Experiencia de TEKIA como parte de la estructura de seguridad que demanda la directiva" 5º Simp. de Túneles. ATC. Bilbao. 2010. http://www.tekia.es/web/images/stories/archivos_interes/2010/V5Simp-Tuneles/seguridad_directiva.pdf
- [9] CHEYREZY, M.; KHOURY, G. & BEHLOUL, M. "Mechanical properties of four high performance concretes in compression at high temperatures". Revue française de Génie Civil. vol 5, Nº 8. 2001. Pp 1159-1180
PIARC Informes del Comité Internacional de Túneles. Varias fechas. ❖