

# Comportamiento del hormigón en condiciones de incendio

Los incendios en túneles son un peligro importante para la vida humana y provocan costosos daños en infraestructuras. Las limitadas instalaciones de evacuación y la dificultad de acceso para las fuerzas de intervención exigen la implementación de amplias medidas de seguridad que deben ser coordinadas y complementarias entre sí.

Los túneles y las vías de transporte subterráneas son medios importantes de comunicación, no sólo en términos de obtención de trayectos más cortos sino también, y cada vez más, como elemento de consideración para la población local y el medioambiente, así como la economía y la industria locales. Generalmente, se espera que los enlaces subterráneos de transporte más importantes estén disponibles sin ningún tipo de restricciones y que operen de forma continuada a todas horas. Las interrupciones debidas a accidentes, fallos técnicos o trabajos de mantenimiento provocan rápidamente atascos y retrasos, y figuran en las estadísticas de política de transporte como pérdidas económicas.

La creciente densidad de tráfico y la demanda de vías subterráneas de comunicación derivan en una mayor probabilidad de accidentes, lesiones y daños. Además de estos hay otros factores que aumentan los peligros potenciales de los túneles para tráfico:

- La longitud cada vez mayor de los túneles modernos.
- El transporte de materiales peligrosos.
- El tráfico bidireccional (con carriles sin división física).
- Mayores cargas de incendio debido a los crecientes volúmenes de tráfico y la mayor capacidad de carga de los vehículos.
- Defectos mecánicos en los vehículos de motor.

Quando se considera la construcción de un túnel, está normalmente ligada a la infraestructura de carreteras y trenes; sin embargo, el uso de la palabra túnel puede confundir ligeramente, ya que la siguiente información aplica por igual a pasajes subterráneos para peatones, estaciones de tren subterráneas, aparcamientos subterráneos para vehículos, etc. De hecho, a cualquier estructura de hormigón. Por tanto, aunque este documento hará referencia a los túneles, todos los datos aplican también a cualquier espacio subterráneo de cualquier tipo.



Normalmente se asume que porque una estructura esté construida con hormigón es completamente resistente al fuego, y por tanto no requiere tomar ninguna medida adicional de protección contra incendios. Por desgracia, la experiencia a lo largo de los años ha demostrado que no es el caso y que debe tenerse en consideración las prestaciones y el comportamiento de las estructuras de hormigón en condiciones de incendio. Además, cuando se hable de túneles y espacios subterráneos, también debe tenerse en consideración la protección de las instalaciones de servicios, como por ejemplo los sistemas de extracción de humos, la protección de cables, equipos de emergencia, etc.

Este capítulo pretendemos proporcionar cierta información sobre el comportamiento del hormigón en condiciones de incendio, mostrar métodos probados de protección de estructuras contra el fuego y proporcionar protección a los servicios dentro de túneles y espacios subterráneos.

### Tipos de exposición al fuego

En los últimos años se ha investigado mucho a nivel internacional para determinar los tipos de fuego que podrían tener lugar en túneles y espacios subterráneos. Esta investigación se ha llevado a cabo en túneles reales en desuso y también en condiciones de laboratorio. Como consecuencia de los datos obtenidos en estas pruebas, se ha desarrollado una serie de curvas de tiempo y temperatura para las distintas exposiciones según se muestra a continuación.

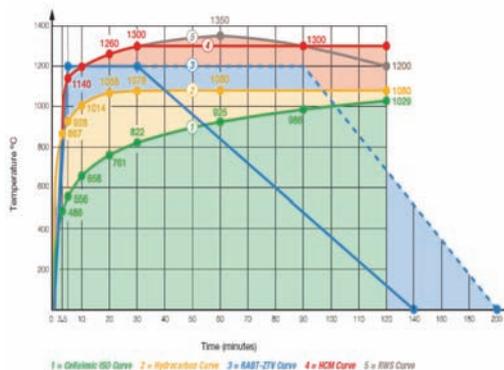
Aunque la investigación sobre el fenómeno del fuego en los túneles continúa, es de destacar que los datos existentes muestran que los incendios dentro de los túneles acarrearán una gravedad mucho mayor que la que se experimentaría en condiciones de cielo abierto. Por ejemplo, en cuanto a datos de tasa de liberación de calor (HRR, que muchos toman como una buena medida de la severidad de un incendio) provenientes de pruebas realizadas en diferentes tipos de vehículos, incendios en muestras de madera, experimentos en bandejas de combustible, etc. Si se comparan los resultados de las pruebas dentro de túneles con aquellos provenientes de las mismas pruebas realizadas en edificios, la conclusión a la que se ha llegado es que en un túnel se puede aumentar la HRR hasta cuatro veces más.

Experimentos adicionales han demostrado que el aumento puede variar con la relación entre la superficie de fuego y la anchura del túnel de una forma cúbica.

Es de destacar que, en la actualidad, esta información sólo parece ser precisa para una superficie de fuego de hasta aproximadamente la mitad de la anchura del túnel, y para túneles ventilados de forma natural. El Instituto Nacional de Pruebas e Investigación de Suecia continúa trabajando en este asunto.

Los métodos de ventilación de un túnel pueden tener también una fuerte influencia en la HRR de los elementos en combustión, y por tanto deberían tenerse en cuenta como factores en cualquier proposición cuando se diseña y se especifica el tipo y el periodo de protección contra incendios.

### Curvas de tiempo y temperatura:



- 1 = Curva ISO de celulosa
- 2 = Curva de hidrocarburo
- 3 = Curva RABT-ZTV
- 4 = Curva HCM
- 5 = RWS Curva

Los incendios en túneles son de una naturaleza diferente si se comparan con los tipos de incendio normales experimentados en construcciones "normales"; con temperaturas muy altas que duran mucho más tiempo. El túnel en sí mismo funciona en ocasiones como un horno de convección, inyectando el aire para alimentar el fuego. La temperatura del aire durante el incendio del túnel del Canal alcanzó un nivel lo suficientemente alto como para calentar el hormigón hasta casi los 1300 °C.

Las diferentes Normas Europeas sobre incendios en túneles coinciden en aceptar que la evolución de la temperatura con el tiempo

difiere notablemente en un incendio en el interior de un túnel de la que puede ocurrir en un edificio sobre rasante. Las características de confinamiento, con efecto horno, así como por la naturaleza de los combustibles que pueden originarlo mayormente plásticos y gasolinas, es decir, combustibles capaces de liberar grandes cantidades de calor en poco tiempo, implican una evolución y una severidad distinta de la que puede darse en los edificios.

En éste último caso, los estudios de evolución de la temperatura han llevado a implantar internacionalmente un modelo matemático reproducible en laboratorio en el cual se representa un incendio de combustibles celulósicos y se alcanza una temperatura de 1000°C en 90 minutos. Este modelo, denominado Curva de Fuego Estándar, está definido por la Norma internacional ISO 834, se recoge también en la Norma UNE EN 1363 y es de aplicación en los ensayos de Resistencia al Fuego que se realizan en España de acuerdo a los requisitos establecidos por el Código Técnico y el RD 312/2005, de acuerdo con lo especificado en la Directiva Europea 89/106/CEE sobre Productos de la Construcción.

Sin embargo, en el caso de incendios en túneles, y a pesar de existir una Directiva Comunitaria para túneles de la red carretera transeuropea, no se ha llegado a un grado de consenso semejante, por lo que cada país ha desarrollado diferentes modelos de Curva de Fuego, de acuerdo a sus propias experiencias y peculiaridades. El punto de partida, sin embargo, es similar. Los incendios en túneles son en la inmensa mayoría de los casos producidos por vehículos ardiendo, siendo su combustible la principal carga de fuego presente. Por tanto, se parte de un fuego de combustibles tipo hidrocarburos, mucho más energéticos y con una liberación más rápida de la energía de combustión. Modelos que parten de esta premisa también han sido desarrollados para ensayo de soluciones en industrias, como la Curva de Hidrocarburos NPC o la americana UL 1709. La Norma UNE EN 1362 Parte 2 contempla entre las acciones térmicas alternativas de ensayo, una curva de fuego de Hidrocarburos.

Esta curva representa el fuego de hidrocarburos en similares condiciones que la

ISO Estándar, en incendios sobre rasante. Para túneles, en los que el incendio queda confinado como entre las paredes de un horno, este modelo, aceptable en muchos casos, puede ser insuficiente, especialmente si se van a transportar por el túnel mercancías peligrosas.

Tomando como base esta premisa, en Alemania se ha desarrollado un modelo de curva, denominada ZTV-RABT, que alcanza 1200 °C en 5 minutos, mantiene esta temperatura por periodos que pueden variar desde 30 a 120 minutos, y es seguido de un periodo de enfriamiento controlado durante 110 minutos. Similarmente, en Holanda, el Rijkswaterstaat ha desarrollado una curva específica para túneles, en que se alcanzan hasta 1350 °C con un periodo de calentamiento inicial hasta 1200 °C en muy pocos minutos, y que representa el incendio que supone en un túnel la combustión incontrolada de una cámara cisterna cargado con 50.000 Lts de petróleo ardiendo durante 120 minutos.

Ante semejantes acciones térmicas, es evidente que los materiales se van a comportar de modo diferente que ante el fuego representado por la Curva Estándar, lo que se ha podido comprobar tanto en estudios de Laboratorio como en la realidad de los incendios acontecidos.

### **Resistencia al fuego del hormigón**

Siempre se ha pensado que el hormigón tiene un buen comportamiento en caso de incendio. No sólo porque es no combustible sino también porque, como parte de una estructura, el hormigón posee mejores propiedades de resistencia al fuego que, digamos, el acero no protegido. Pero si comparamos la pérdida de fuerza entre el hormigón y el acero cuando aumenta la temperatura, nos encontramos que los dos materiales difieren muy poco a este respecto.

En un incendio, la tasa de aumento de temperatura hasta la temperatura crítica (aproximadamente 500 °C) en hormigón reforzado sujeto a tensión es comparable con la de una viga de acero, suponiendo que los aceros son aproximadamente del mismo tipo y que la tensión máxima es de aproximadamente el mismo orden de magnitud.



Experimentos con incendios estándar han demostrado que cuando el refuerzo carece de la protección requerida por el hormigón, esta temperatura crítica de aproximadamente 500 °C se alcanza a los 10 minutos de exposición al tipo de temperaturas que se esperarían en las condiciones de un incendio en un túnel.

Dado que el hormigón posee una buena resistencia al fuego, la pregunta de por qué es necesario entonces, en ciertas circunstancias, protegerlo con revestimientos resistentes al fuego, surge de forma natural. Pruebas de laboratorio han demostrado que las estructuras de hormigón expuestas a la compresión fallan generalmente cuando se supera su fuerza de compresión. En la práctica, será extraño que toda una estructura se vea expuesta a los efectos de la compresión, excepto quizás cuando se haya utilizado hormigón pretensado.

¿Qué es el Spalling? Cuando el hormigón se expone a un calor extremo durante un periodo prolongado de tiempo, las uniones químicas entre las moléculas de agua del hormigón se rompen, destruyendo los puentes moleculares que unen los diversos materiales que componen el hormigón. A medida que las moléculas de agua se extraen del hormigón mediante la deshidratación, el hormigón pierde su cohesión y se debilita, empujando trozos del hormigón

hacia fuera de las paredes del túnel en capas muy finas como las capas de una cebolla. Este fenómeno, denominado comúnmente Spalling, puede expandirse con el tiempo a través del anillo de hormigón de un túnel, capa a capa.

Cuando tiene lugar el Spalling, que también puede ser peligroso para el entorno inmediato debido a la naturaleza explosiva del mismo en algunos tipos de hormigón, el refuerzo queda al descubierto. En un incendio “normal” es poco probable que falle completamente un hormigón reforzado de forma convencional, pero los costes de reparación pueden ser considerables. Cuando se utiliza hormigón pretensado, el efecto perjudicial del Spalling es mayor y más peligroso.

Para constatar estos efectos se han realizado de ensayos a escala real, como los que se han llevado a cabo en el Túnel Runehamar, o más recientemente en las instalaciones construidas a tal efecto en el Túnel de TST de San Pedro de Anes, donde se ha construido un túnel experimental de 600 m de longitud, para desarrollar ensayos de investigación de comportamientos tanto de los propios incendios como de los medios previstos para su extinción, en condiciones reales y teniendo en cuenta los distintos efectos de los sistemas de ventilación.

Dadas las especiales características de este túnel, destinado a sufrir incendio tras incendio, es gran preocupación de sus gestores que los daños que pueda sufrir la estructura del túnel sea la mínima posible, para minimizar los gastos de reparaciones. Promat IBERICA S.A. ha colaborado habitualmente con TST en los ensayos que prepara mediante la protección de la estructura en las zonas de túnel a utilizar en cada caso con placas de Silicato, un producto especialmente diseñado mediante técnicas de ingeniería de matriz mineral para cumplir con todos los requisitos de protección estructural: Alto aislamiento térmico con bajos espesores, resistencia mecánica, fácil y rápida colocación, posibilidad de curvatura in situ para adaptarse a la forma del túnel...

Desde que la instalación entró en funcionamiento, las Placas de silicato han sido utilizadas para la protección. En ningún caso las temperaturas de la superficie de hormigón alcanzaron niveles críticos, a pesar de que las placas sufrieron acciones severas: hasta 50 incendios, incluyendo dos fuegos diarios, seguidos de liberación de agua, resistiendo perfectamente.

Con dicha colaboración queda perfectamente demostrada la utilidad de los revestimientos con placa, y su extraordinaria resistencia, avalada, por otra parte por numerosos ensayos realizados en Laboratorios de acuerdo con las severas curvas de incendio de túneles utilizadas en Europa, y cuya idoneidad ha sido establecida por el organismo independiente alemán STUVA.



### Protección contra incendios de los servicios esenciales

En la construcción de cualquier túnel, la aplicación de material de protección para potenciar la resistencia al fuego de la estructura es sólo parte de los trabajos a realizar. Por sí mismo, esto no va a evitar la pérdida de vidas que tendría lugar si hubiese un incendio en un túnel. Es necesario considerar la incorporación de sistemas adicionales activos y pasivos en el diseño para asegurar un conjunto completo de sistemas de seguridad, entre los cuales estarían los siguientes elementos.

- Aumentar la resistencia al fuego de la estructura
- Sistemas de suministro de aire
- Sistemas de conductos de extracción de humos
- La provisión de Galerías de Servicio y evacuación
- Sistemas de detección activos y pasivos
- Sistemas de extinción de incendios
- Puertas contra incendios y sistemas de detención del fuego

### Sistemas de suministro de aire y extracción de humos

Como se ha demostrado en muchos estudios sobre la causa de las muertes provocadas por incendios en túneles, la mayoría de ellas son resultado de la inhalación de humo.

Es por tanto crucial que para túneles se incluya algún tipo de sistema de extracción de humos en el diseño. Por la propia naturaleza de los gases y de las partículas que los sistemas deben eliminar de las ubicaciones de los túneles, cualquier conducto o sistema de extracción tendrá que estar construido de tal manera que por sí mismo sea resistente al fuego.

Sin embargo, no es tan sencillo como instalar ventiladores de extracción y simplemente asumir que vayan a realizar los servicios necesarios. A principios de los 90 se realizaron investigaciones importantes (cerca de 98 pruebas) en el túnel Memorial de EE.UU., que proporcionaron datos significativos sobre las prestaciones de los sistemas de ventilación, en un rango de sistemas de ventilación de natural, semitransversal, totalmente transversal y longitudinal con cargas de fuego de 10, 20, 50 y 100 MW de gravedad. También se probaron una serie de sistemas de aspersores y de inundación durante este programa.

Más recientemente se han llevado cabo unas pruebas en el nuevo túnel Benelux en Holanda sobre los efectos de la ventilación sobre los niveles de humo, aspersores, etc.

En aquellos túneles con sistemas de ventilación longitudinales, la ventilación puede tener un efecto importante sobre la HRR del incendio. Diversas investigaciones y experimentos han demostrado que la ventilación longitudinal en un túnel puede provocar que diferentes tipos de incendios se comporten de maneras muy diferentes. El HRR de incendios en vehículos pesados en particular puede aumentar en gran medida, incluso con bajos índices de ventilación, mientras que el HRR de un coche bajo exactamente las mismas condiciones se podría reducir mucho. No existe un método sencillo para calcular las complejas relaciones entre las velocidades de ventilación y los aumentos de las tasas de liberación de calor.

La ventilación también puede afectar a la distribución de un incendio a lo largo de un túnel. Por ejemplo, durante el desastre del Mont Blanc, se produjo una propagación del incendio desde la fuente del mismo hacia los coches situados a cerca de 90 m de distancia.

El efecto de la ventilación resulta en que el fuego se mueva de forma horizontal en lugar de vertical, y como resultado de esta acción, los vehículos ubicados más abajo dentro del túnel podrían posiblemente entrar en ignición.

Los efectos de la ventilación natural y longitudinal en los túneles ha estado sujeto a ciertos experimentos, aunque los efectos sobre los incendios en túneles de la ventilación semitransversal o completamente transversal son más desconocidos hasta el momento, pero se están llevando a cabo estudios completos en túneles de ensayo a lo largo de Europa

En los túneles existen una serie de maneras para proporcionar los sistemas de extracción, aunque en general se reducen a dos conceptos básicos. El primero es la construcción de una cámara de presión dentro del espacio del techo del túnel, ya sea de hormigón o mediante la construcción de un falso techo

En este caso, el falso techo proporciona protección a las secciones de hormigón y, con la inclusión de una membrana horizontal

construida a partir de la placa, forma el sistema de extracción de humos.

El segundo método es la instalación de un sistema de conductos de acero y a continuación un revestimiento con material de protección contra incendios para proporcionar al conducto un cierto grado de resistencia al fuego. Para entornos especialmente agresivos en los que se requiera un alto grado de fuerza y resistencia a impactos, debería considerarse el uso del producto especializados.

### **Sistemas de protección de cableado**

En caso de incendio puede ser vital para la seguridad de los ocupantes del túnel que ciertos sistemas eléctricos sigan funcionando hasta que la gente haya escapado. Dichos sistemas requerirán por tanto estar protegidos del fuego durante un periodo de tiempo determinado y pueden incluir:

- 1) Alarmas de incendio operadas eléctricamente
- 2) Iluminación de vías de escape de emergencia
- 3) Sistemas de extinción operados eléctricamente
- 4) Sistemas de ventilación y de extracción de humos
- 5) Fuentes de alimentación para los ascensores de incendios en construcciones de gran altura.

Además de la protección contra los incendios fuera del conducto, normalmente es dentro del propio conducto se mantenga dentro del mismo, como por ejemplo un caso en el que los revestimientos de un cable prenda debido a una sobrecarga eléctrica.

Un conducto correctamente diseñado:

- 6) Evitará la propagación del incendio de un compartimiento de la construcción a otro
- 7) Ayudará a mantener las vías de escape
- 8) Asegurará la operación continuada de otros servicios dentro de un mismo lugar común
- 9) Reducirá los daños en zonas localizadas
- 10) Contendrá el humo y los vapores tóxicos de los cables en llamas.

Los sistemas de protección de cables pueden estar contruidos de la misma forma que los sistemas de conductos de ventilación.

## Galerías de Servicio y evacuación

En los túneles largos, los refugios de seguridad deberían formar una parte importante del diseño del túnel. Incendios recientes en túneles han demostrado que la exposición al humo y los vapores tóxicos de los vehículos en llamas es la causa principal de la pérdida de vidas, y ha habido muertos incluso a distancias relativamente cortas del origen del incendio. La provisión de refugios de seguridad es por tanto imperativa en túneles largos, tanto para la protección de los pasajeros de los vehículos hasta que los servicios contra incendios puedan alcanzarles como para proporcionar un lugar que pueda suponer un respiro a la temperatura y del humo para los bomberos.

Idealmente, cualquier refugio de seguridad debería tener un periodo mínimo de resistencia al fuego que iguale el de la protección estructural principal, y debería estar construido de tal manera que sea resistente tanto a la temperatura (aislamiento) como a la entrada de humo en la cámara. En algunos incendios recientes, personas que han podido acceder a un refugio de seguridad han muerto después por la exposición a los efectos de la temperatura y por la entrada de humo en la cámara, por lo que es importante tener en cuenta la provisión de un suministro de aire independiente para estas zonas.

## ¿Por qué proteger los túneles?

Existen tres razones para proteger contra incendios un túnel. La primera es la seguridad humana, que aunque no es necesariamente una función directa de las prestaciones estructurales en caso de incendios, una estructura que se colapsase no permitiría a las personas evacuar de la misma de forma segura. Esta seguridad tiene más que ver con la función de las instalaciones de servicios como iluminación de emergencia, sistemas de extracción de humos, etc.

Sólo en Europa han tenido lugar en túneles en carreteras y vías de ferrocarril al menos 10 situaciones importantes de incendio e incontables incendios menores. Estos incendios han derivado en una pérdida importante de vidas (221 muertos en cuatro incendios que ocurrieron en un periodo de dos años) y en todos los casos un daño estructural

significativo, sin mencionar los costes económicos. Como ejemplo se detallan a continuación algunos de los incendios en túneles que han tenido lugar en los últimos años y la pérdida de vidas resultante.

Segundo, están las prestaciones de la estructura en sí misma, si permanecerá en su lugar, si se colapsará, posiblemente causando daños colaterales a otras estructuras y lesiones a las personas, etc. En el incendio del Mont Blanc hubo un Spalling importante del hormigón estructural. Durante el incendio que tuvo lugar dentro del túnel St Gotthard en 2001 se colapsó una sección de la estructura de 100 m. de longitud que entorpeció las actividades de los servicios de rescate. Estos dos túneles atraviesan macizos rocosos y por tanto su colapso o Spalling es localizado, aunque costoso e inconveniente, pero no pusieron en peligro la vida de las personas situadas fuera de las zonas dañadas. Sin embargo, si estos túneles hubiesen sido del tipo sumergido, el daño estructural podría haber derivado en la inundación de los túneles, con todas sus implicaciones asociadas.

Es necesario destacar que, después del incendio en el túnel del Canal, el Spalling del hormigón fue tan grande que la única diferencia entre la pérdida de este túnel y una situación en la que se pudiera haber reparado fue la fina capa de sellado entre la estructura de hormigón y la capa de roca para la contención del agua. Un margen muy fino en el que confiar, pero cuyo riesgo se podía haber evitado fácilmente si hubiesen existido los sistemas adecuados de protección pasiva contra incendios para complementar los sistemas activos.

Tercero, el daño económico causado como resultado de los fallos de un túnel, etc. Este coste económico no está relacionado sólo con la reparación o la reconstrucción de la estructura; normalmente tiene más que ver con el impacto de la pérdida de negocio, desvíos de tráfico, etc. que derivan en costes aún mayores.

Un ejemplo de esto es el incendio dentro del túnel del Canal, en el que los daños económicos se estimaron en el doble del coste real de las reparaciones del túnel, incluso cuando el coste de las mismas fue estimado en 87 millones de euros. El coste adicional de pérdida de negocio, sustitución de la infraestructura y materiales (como por ejemplo camiones, vagones de tren,

etc.) junto con el impacto del cierre del túnel fue estimado según algunas fuentes en cerca de 211 millones de euros, sólo teniendo en cuenta la pérdida económica.

Poniendo como ejemplo el túnel del Mont Blanc como túnel únicamente de carretera, las diferencias no son tan marcadas, con una estimación del coste de reparación de cerca de 189 millones de euros y un coste económico adicional de 250 millones. Sin embargo, hay que considerar el impacto

socioeconómico de una forma más amplia que simplemente el propio túnel. Las estimaciones de los efectos sobre la economía local italiana cerca de la zona del túnel del Mont Blanc ascienden a 2,5 billones de euros. Por tanto, es necesario tener en cuenta dichos costes socioeconómicos en cualquier análisis de riesgos.

Por consiguiente, en términos de protección contra incendios en túnel y vías subterráneas, es necesario considerar los siguientes términos:

- Mejora de la resistencia al fuego de la estructura
- Sistemas de suministro de aire
- Sistemas de conductos de extracción de humos
- La provisión de Galerías de Servicio y evacuación
- Sistemas de detección activa y pasiva
- Sistemas de extinción de incendios

Con este artículo hemos intentado repasar de manera general la problemática generada en la consideración de la protección necesaria de un túnel, exponiendo la misma en términos de seguridad para los usuarios las necesidades de una normativa y unas medidas de protección adecuadas.

[www.promat.es](http://www.promat.es) ■