

La protección de los túneles en España

Protection of tunnels in Spain

Rafael Sarasola Sánchez-Castillo. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Presidente de Sicur, Salón Internacional de la Seguridad; presidente de TECNIFUEGO-AESPI, Asociación Española de Sociedades de Protección contra Incendios; Vicepresidente de CEPCO, Confederación Española de Productos de Construcción; y director general de Promat Ibérica. info@promat.es

Resumen: La preocupación por las consecuencias de los incendios en los túneles está llevando a un imparable proceso de búsqueda de la seguridad contra incendios en dichas construcciones. Cada vez más se estudia la extracción de humos y salidas de emergencia, la protección de las instalaciones eléctricas y, muy importante, de la propia estructura de hormigón del túnel. Se están planteando soluciones de Protección Pasiva contra el Fuego que tienen una incidencia muy positiva en la mejora de la Resistencia al Fuego. 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. 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 1.000°C en 90 minutos.

Palabras Clave: Fuego, Túnel, Ensayo europeo, Protección

Abstract: The concern for the consequences of fires in tunnels has led to an ongoing process to seek improved fire safety in these constructions. Ever more studies are made on smoke extraction and emergency exits, protection of electrical installation and, of utmost importance, the concrete structure of the tunnel itself. Solutions are being raised such as passive fire protection which makes a very important contribution to improved fire resistance. The different European codes on fires in tunnels all accept that the evolution of temperature with time notably differs within a tunnel from that occurring in a building above ground. In this regard, studies on temperature evolution have led to the introduction of laboratory based mathematical models representing fires of cellulose fuel which reach temperatures of 1000°C in 90 minutes.

Keywords: Fire, Tunnel, European testing, Protection

La preocupación por las consecuencias de los incendios en los túneles, de las cuales hemos sido testigos recientemente a raíz de los incendios producidos en Mont Blanc, San Gotardo, Tauern, etc., está llevando a un imparable proceso de búsqueda de la seguridad contra incendios en dichas construcciones. Cada vez más se estudia la extracción de humos y salidas de emergencia, la protección de las instalaciones eléctricas y, muy importante, de la propia estructura de hormigón del túnel. Se están planteando soluciones de Protección Pasiva contra el Fuego que tienen una incidencia muy positiva en la mejora de la Resistencia al Fuego.

Dichas soluciones no son nuevas. Los países europeos más avanzados en este sector llevan utilizándolas desde los años 70, especialmente Alemania y Holanda. La preocupación por este problema ha llevado a la Administra-

In the wake of recent fires in the Mont Blanc, St. Gotthard and Tauern tunnels, among others, the concern for the consequences of tunnel fires has led to an ongoing process to seek improved fire safety. Ever more studies are made on smoke extraction and emergency exits, protection of electrical installation and, essentially, the concrete structure of the tunnel itself. Solutions are being forwarded such as passive fire protection which makes a very important contribution to improved fire performance.

These solutions are not new and the more advanced European countries in this sector have been employing these measures ever since the 70's, with Germany and Holland to the fore. In response to this problem, the authorities of these countries have prepared specific tunnel protection codes and

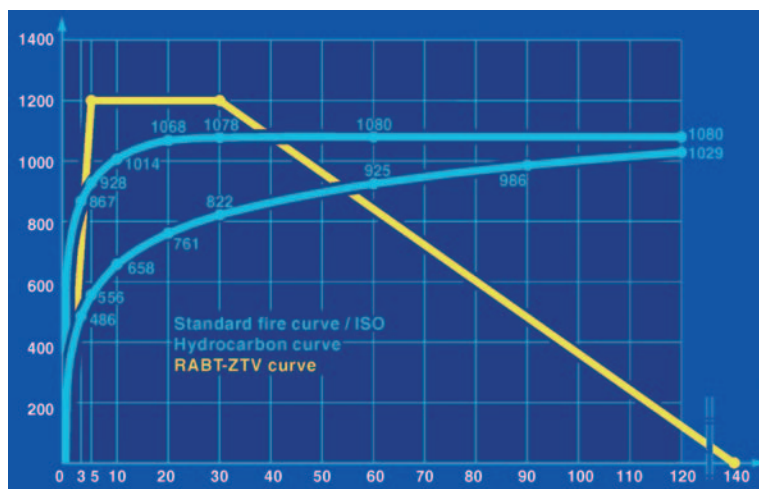


Fig. 1.

ción de estos países a desarrollar normas específicas de protección aplicables a túneles, estableciendo requisitos y, especialmente, metodologías de prueba y ensayo que garanticen el cumplimiento de dichos requisitos.

De entre los sistemas específicos de protección de túneles, quizás sea la protección del hormigón estructural la menos conocida en nuestro país. Analizaremos aquí el comportamiento de dicho material bajo acción de un incendio de la intensidad que puede esperarse en un túnel.

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. 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 1.000°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 23.093 española, y es de aplicación en los ensayos de Resistencia al Fuego que se realizan en España de acuerdo a los requisitos establecidos por la NBE-CPI/96, y en los futuros ensayos europeos desarrollados por CEN 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, 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

establecidos estándares y métodos de prueba para garantizar el cumplimiento de estos estándares.

Of all the tunnel protection systems, the protection of the structural concrete is, perhaps, the least well known in this country. In this article we will consider the behaviour of this material under the fire conditions which could be expected in a tunnel.

The different European codes on fires in tunnels all accept that the time-related temperature evolution within a tunnel notably differs from that occurring in a building above ground. In this regard, studies on temperature evolution have led to the introduction of laboratory based mathematical models representing fires of cellulose fuel which reach temperatures of 1000°C in 90 minutes. This model, referred to as the *Standard Fire Curve*, is defined by the international code ISO 834, and is also reflected in the Spanish Code 23,093, and is applicable to Fire Resistance tests carried out in Spain in accordance with the stipulations of the Spanish NBE-CPI/96 code and in future European tests carried out by the CEN, in accordance with that established in European Council Directive on Construction Products (89/100/EEC).

However, the same degree of consensus does not apply to tunnel fires and each country has developed different Fire Curve models in accordance with their own experience and characteristics. This aside, the start-off point for all these models is essentially the same as the vast majority of tunnel fires are caused by burning vehicles and where the vehicle fuel serves as the main source of the fire. As such, the models are based on hydrocarbon type fuels which are far more energetic and with a faster release of combustion energy. Models based on this premise have also been developed for the testing of industrial solutions such as the NPC Hydrocarbon Curve or the American UL1709. The Spanish code INE EN 1362 Part 2 (taken from the CEN standard of the same number and due to replace Spanish Code UNE 23,093 as the basic Fire Resistance test code) considers a Hydrocarbon Curve, among the alternative thermal actions subject to testing, described by the following formula:

$$T = 1080 (1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675 e^{-2.5t}) + 20$$

Where:

t is the time after the start of the fire

T is the average temperature required in furnace, in °C

As one can see, in this model a 1000°C is reached in less than 10 minutes

This curve represents a hydrocarbon fire in similar conditions as the ISO Standard in overground fires. In

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 (Transposición de la Norma CEN del mismo número, y llamada a sustituir a la existente UNE 23.093 como norma básica de ensayos de Resistencia al Fuego) contempla entre las acciones térmicas alternativas de ensayo, una *Curva de Hidrocarburos* que responde la fórmula:

$$T = 1080 (1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675 e^{-2,5t}) + 20$$

donde:

t es el tiempo desde el inicio

T es la temperatura media requerida en el horno, en °C

Como puede observarse, en este modelo se alcanzan los 1.000 °C en menos de 10 minutos.

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 1.200 °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 1.350 °C con un periodo de calentamiento inicial hasta 1.200 °C en muy pocos minutos, y que representa el incendio que supone en un túnel la combustión incontrolada de un camión cisterna cargado con 50.000 Lts de petróleo ardiendo durante 120 minutos. En la Figura 1 se pueden comparar las distintas curvas mencionadas.

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. Concretamente en el caso del hormigón estructural en túneles, se observan los efectos siguientes:

1.- Desconchamiento por efecto *spalling*. La extraordinaria rapidez con que se calienta el hormigón genera el paso a vapor del agua contenida en la masa con velocidad explosiva. Como generalmente los



Fig. 2. Incendio de un camión en el túnel de Velse/Lorry fire in Velse Tunnel.

tunnels where the fire is confined in the manner of furnace walls, this model, which is otherwise acceptable, may be insufficient and particularly when hazardous goods are transported through the tunnel.

On this premise, Germany has developed a curve model, the ZTV-RABT curve, which reaches 1200°C within five minutes and maintains this temperature for periods between 30 and 120 minutes, followed by 110 minute controlled cooling period. Similarly, the Rijkswaterstaat Ministry of Transport in the Netherlands have developed the RWS curve for tunnels and where temperatures of up to 1350°C are reached with an initial heating period of up to 1200°C in just a few minutes. This latter curve is based on the assumption that in a worst case scenario, the uncontrolled fire from a 50, 000 litre oil tanker could last up to 120 minutes. Figure No... shows a comparison between the two curves.

In the light of these thermal actions it is clear that materials will behave in a different manner to that of fires represented by the Standard Curve and this has duly been verified in laboratory studies and in actual fires. In this regard, the following effects have been observed in terms of the structural concrete of tunnels:

1. *Spalling*. The incredibly fast heating of the concrete causes the water in the concrete mass to convert to steam with explosive speed. As the majority of concretes employed tend to have small pores, this steam cannot be readily released and this causes a pressure build-up capable of destroying the outer layers of the concrete, exposing the reinforcement and increasing the risk of tunnel collapse. This effect



Fig. 3. Incendio enl túnel de Mont Blanc/Fire in Mont Blanc Tunnel.

hormigones usados tienen el poro pequeño, este vapor no puede liberarse adecuadamente, lo que genera una presión capaz de destruir las capas más externas de hormigón, dejando expuestas las armaduras, y aumentando el riesgo de colapso del túnel. Este efecto ha sido estudiado en laboratorios, como el realizado por el SINTEF noruego en diciembre de 1988, en el que se comprueba este efecto con acciones térmicas de fuego de hidrocarburos, y se observa una disminución casi total cuando el hormigón recibe una protección adecuada.

- 2.- Destrucción de la unión entre el hormigón y el refuerzo metálico, con pérdidas de resistencia cuando el hormigón se calienta por encima de los 300 °C
- 3.- Deformación por acciones de dilatación térmica
- 4.- Pérdida de resistencia en el propio hormigón a temperaturas de unos 500 °C
- 5.- Destrucción de las juntas de dilatación.

Estos efectos dañan irremediablemente la estructura de un túnel, lo que origina reparaciones muy costosas y difíciles de realizar. Sin embargo, si se prevé una protección adecuada, estos efectos se reducen al mínimo, con importantes ahorros en reparaciones que compensan sin ninguna duda las inversiones iniciales en dicha protección.

Las protecciones previstas (y sus sistemas de fijación) deben tener características demostradas de comportamiento en caso de incendio, así como otras que le permitan resistir las acciones propias de su situación y normal uso del túnel, como las variaciones de presión debido al paso de vehículos a alta velocidad, que pueden llegar a (800 Pa en túneles de carretera, a (1.100 Pa en túneles de ferrocarriles de transporte y hasta (5.000 Pa en túneles de ferrocarriles de alta velocidad.

has been examined in laboratory studies, such as those carried out by the Norwegian SINTEF in December 1988 and where this effect was verified under the thermal action of a hydrocarbon fire and where the spalling effect was seen to decrease almost entirely when the concrete was suitably protected.

2. Loss of bond strength between the concrete and the reinforcement when the concrete heats up to over 300°C.
3. Deformation due to thermal expansion
4. Loss of strength of concrete at temperatures of 500°C
5. Destruction of expansion joints.

These effects invariably damage the tunnel structure and give rise to very expensive and complicated repair work. However, the provision of suitable protection reduces these effects to a minimum and provides considerable savings in repair work which clearly offset the cost of protection.

The forms of protection (and their fixing systems) should have proven fire performance and other characteristics to ensure resistance under both extreme conditions and the normal use of the tunnel, such as the pressure variations arising from the passage of vehicles at high speed and which may reach up to ± 800 Pa in road tunnels, $\pm 1,100$ Pa in freight train tunnels and up to $\pm 5,000$ Pa in high-speed rail tunnels.

These proven characteristics have to be established by a corresponding test report. In the case of fire resistance, these tests consist of the preparation of 4 x 3 m specimens of the concrete and its protection which accurately reflect the type to be employed. The specimen is placed in a furnace which is specially prepared to reflect the action of a standardized thermal programme such as those indicated earlier. Throughout the testing period, recordings are taken of the deformation of the concrete, spalling, temperature gradients at the interface of the concrete and in the reinforcement, by means of a specific number of thermocouples suitably placed in the concrete mass.

The requirements demanded of the protection system depend on the type of tunnel, its use and the pertinent legislation of each country. The requirements of two of the most common standards are indicated below:

German ZTV requirements:

- Maximum temperature at the interface of the concrete < 300°C when subject to the RABT curve
- Maintenance of protection during the test period
- Minimum and superficial spalling effect

Estas características demostradas deben probarse mediante los correspondientes informes de ensayo. En el caso de la Resistencia al Fuego, este tipo de ensayos consiste en preparar una muestra de hormigón y su protección lo mas parecida a como se instalará realmente, con tamaños de 4 x 3 m. y someterla en una instalación (horno) adecuada a la acción de un programa térmico normalizado como los anteriormente expuestos, midiendo durante todo el proceso las deformaciones del hormigón, la aparición del fenómeno *spalling*, y los gradientes de temperatura en la cara inferior del hormigón y en la armadura de refuerzo, controlado por un determinado número de termopares de control adecuadamente situados en la masa del hormigón.

Los requisitos que debe cumplir el sistema de protección dependen del tipo de túnel, del uso y de la legislación al respecto de cada país. A continuación se exponen algunos de los mas frecuentes:

Requisitos ZTV alemanes:

- Máxima temperatura en la cara inferior del hormigón < 300 °C cuando se somete a la curva RABT
- Permanencia de la protección durante el periodo de ensayo
- Efecto *spalling* mínimo y poco profundo.
- Temperatura en el sellado de la junta de dilatación entre 60 y 150 °C según el material

Requisitos RWS holandeses:

- Resistir al menos dos horas los efectos de la Curva RWS en dos ensayos diferentes.
- Máxima Temperatura permitida en la cara inferior del hormigón < 380°C, complementada con
- Máxima temperatura en las armaduras de refuerzo 250°C, con un recubrimiento de hormigón de 25 mm.
- Temperatura en las juntas de dilatación inferior a 60 °C

La emisión de un informe de ensayo por el Laboratorio clasifica y avala la solución ensayada para su uso en la protección de túneles, y puede ser complementado por otro tipo de ensayos, como ciclos de hielo deshielo, resistencia a gases de los tubos de escape, ensayos de abrasión (*Test Taber*), y otros, dependiendo de las solicitudes finales de uso del propio túnel.

¿Y en España, qué requisitos se exigen? Lamentablemente aún no existe una Normativa clara a nivel nacional que fije los requisitos. Existen algunas normas por Comunidades Autónomas, siendo las más importantes las de Cataluña relativas a tráfico de ferrocarril, que se refieren a los mas conocidos sistemas de protección (sistemas de extin-



Fig. 4. Incendio en el Eurotúnel/Fire in the Eurotunnel.

- Temperature in expansion joint seal between 60 and 150°C according to material.

Dutch RWS requirements:

- Minimum two hour resistance of RWS Curve effects in two different tests
- Maximum temperature at the interface between concrete and protective lining < 380°C, and that,
- Maximum temperature on the reinforcement be less than 250°C with a 25 mm concrete covering.
- Temperature at the expansion joints of less than 60°C

The ensuing test report issued by the laboratory classifies and guarantees the tested solution for use in tunnel protection and may be supplemented by additional testing such as freeze-thaw cycles, exhaust fume resistance, Taber abrasion test and others depending on the eventual use requirements of the tunnel.

And what are the requirements in Spain? Unfortunately do not have a clear national standard establishing these requirements. Some standards are employed by the regional autonomous communities, the most important of which being those of Catalonia regarding rail traffic and which refer to the more common protection systems (fire extinguisher and smoke

ción, de extracción de humos, etc.), pero se ignora totalmente cualquier aspecto relativo a la protección de la propia estructura del túnel. Mientras que Francia ha tomado buena nota de los acontecimientos recientes y ya dispone de una norma de ensayo para sistemas de protección para Túneles sobre la base de una curva de ensayo de hidrocarburos modificada, y ha empezado a proteger sus túneles de acuerdo con ella, como el de Tolón, en España todavía no se ha presentado iniciativa al respecto, con lo que la seguridad de los túneles nacionales depende de los buenos criterios de los técnicos e ingenieros responsables de los proyectos, muy conscientes, en general, de la importancia de estos aspectos. ♦

extraction systems, etc.), but totally ignore any aspect regarding the protection of the tunnel structure itself. France has taken note of recent events and has established a code for the testing of tunnel protection systems on the basis of a hydrocarbon modified curve and has already begun to protect tunnels in accordance with the same, this being the case of the Toulon Tunnel. However, Spain has yet to present any initiative in this regard and the safety of national tunnels purely has to rely on the correct criteria of the technicians and engineers responsible for these project, in spite of the general awareness of the importance of these aspects. ♦

Referencias

-Proceedings of the Internacional Symposium on Catastrophic Túnel Fires, 20-21 Nov. 2003 Boras, Sweden SP Fire Technology SP Reports
-Matrix Engineered Products - the ultimate solution to the multiple needs of fire protection in tunnels. O Anton ETI European Transopor Infrastructure 2003
-Runehamar Tunnel Fire Tests - UPTUN Fire Protection; Octavian Anton, X Wu, Proceedings of the Internacional Symposium on Cata-

strophic Túnel Fires, 20-21 Nov. 2003 Boras, Sweden
-Summary of Large Scale Fire tests in Runehamar Tunnel in Norway, published by UPTUN, TNO and Promat, April 2004
-DIRECTIVE 2004/54/EC of minimum safety requirements for tunnels in the TransEuropean Road Network
-NORMA UNI 11076 Modalità di prova per la valutazione del comportamento di provetti applicati a soffitti di opera sotterranee, in condizioni di incendio Dic. 2003

-ITA/AITES Guidelines for structural fire resistance for road tunnels. Working group n° 6 Maintenance and Repair May 2004
-TNO Building and construction Research. Fire Protection in Tunnels Part 1 Fire Test procedure. G.L. Tan, G.M. Wolsnik, J. Hoeksma (RWS) C. Both, P.W. van de Haar (TNO) 2000
-Circulaire Interministerielle n° 2000-63 du 25 de août 2000 relative a la sécurité dans les tunnels du reseau routier national. Ministère de L'Interieur
-STUVA Report Pormatect T Fire Protection Linings for Vehicle Tunnels. October 2005