

Uso de fibras de polipropileno para mejorar la resistencia al fuego del hormigón

Desde hace años las estructuras de los túneles han sido calculadas eficazmente para resistir las cargas mecánicas a las que estos estarán expuestos a lo largo de su vida útil; sin embargo, existe otro tipo de fenómeno que debe ser tomado en cuenta a la hora de diseñar los soportes de los túneles, el fuego. Lo expuesto en este artículo son pruebas y consideraciones realizadas para materiales del portafolio *Maccaferri* y *A. Bianchini Ingegnieri, S.A.* En todo caso, la realidad técnica es que todo proveedor debe demostrar que los materiales son aptos y producen el comportamiento adecuado para las curvas de calentamiento previstas en la especificación del proyecto.

Palabras clave: CARGA, COMPORTAMIENTO, CURVA DE CALENTAMIENTO, DAÑO, ESTRUCTURA, FIBRA, FUEGO, HORMIGÓN, PROTECCIÓN PASIVA, SPALLING, TÚNEL.



**Antonio GALLOVICH ⁽¹⁾,
Bruno ROSSI ⁽¹⁾, Roberto MAJORAL ⁽²⁾**

⁽¹⁾Officine MACCAFERRI SpA, Bologna-Italia

⁽²⁾A. BIANCHINI INGEGNERO, S.A. - España

El riesgo que ocurra un incendio dentro de un túnel se encuentra latente constantemente en la mayoría de los túneles del mundo, y debido a los recientes accidentes ocurridos en varios túneles donde no solo hubo daños estructurales sino también la pérdida de vidas humanas, el diseñar estructuras resistentes al fuego se ha convertido en un asunto de gran relevancia tanto para los organismos reguladores como para los mismos proyectistas.

Dentro de los eventos en materia de túneles más relevantes afectados por incendios tenemos el *Túnel Great Belt* en Dinamarca, *The Channel Túnel* entre Dinamarca y Noruega, y por último el *Mont Blanc* que ocasiono la pérdida de cuantiosas vidas humanas. En la Tabla de la **Fig. 1** se muestra un resumen de los daños ocasionados en términos estructurales en estos eventos.

El hecho que los túneles sean estructuras confinadas, y que en el momento de producirse un incendio las llamas se encuentran en contacto directo con el hormigón de la estructura, tiene como consecuencia que las temperaturas que se alcanzan sean muy elevadas, ocasionando el deterioro rápido de la estructura en caso de no existir ningún tipo de protección antifuego.

La función primordial que debe ser cumplida por cualquier instrumento de protección contra el fuego dentro de los túneles es la de darle el tiempo necesario a las personas que se encuentran dentro de este para escapar. Además, asegurar la resistencia mecánica de la estructura para que los bomberos puedan entrar en el túnel y extinguir el fuego. Queda claro que principalmente son los primeros momentos del incendio en donde una protección pasiva antifuego debe actuar.

La exposición de los elementos constructivos a temperaturas altas trae como consecuencia la alteración de las características físicas y mecánicas de los mismos, reduciendo su funcionalidad estructural. En el caso específico del hormigón esta degradación se va dando por etapas a medida que las temperaturas se incrementan. Esta degradación puede observarse a través de la representación gráfica de la **Fig. 2**.

El primer fenómeno que ocurre en el momento de un incremento de temperatura es el del desconche de la cara superficial o *spalling*; en el momento que las temperaturas superficiales del hormigón empiezan a incrementar la mayoría del vapor de agua que se encuentra dentro del hormigón intentara dirigirse al inte-

rior donde las temperaturas son menores, este fenómeno trae como consecuencia el incremento de la presión interna de la matriz hasta llegar al punto de superar la propia resistencia del hormigón produciéndose el fenómeno de *spalling*, o desconche de la cara superficial.

Este desconche de la cara superficial se produce en forma de explosiones violentas, las cuales ocurren normalmente sobre los 20 ó 30 minutos después de iniciarse el fuego, para una tasa promedio de incremento de temperatura de ± 2 a 3 grados centígrados por minuto, llegando a lograr este fenómeno sobre una temperatura de 300 grados centígrados. A continuación se muestra gráficamente en la **Fig. 3**, la explicación del fenómeno.

Para comprender con más exactitud el proceso de deterioro del hormigón debido al incremento de la temperatura, en la **Fig. 4** se muestra un esquema gráfico de las reacciones físico-químicas ocurridas durante el incremento de la temperatura que abarca desde el inicio del *spalling* y deterioro de la capacidad resistente del hormigón hasta el colapso del material.

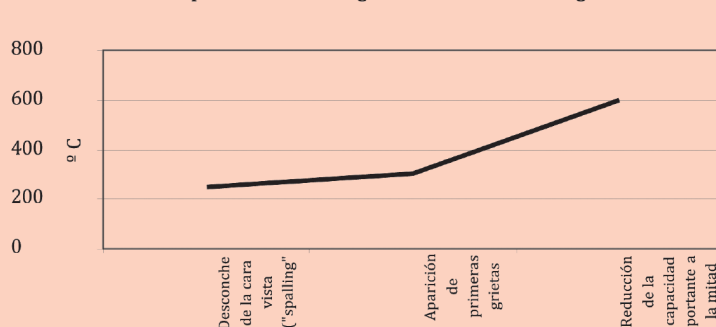
Es importante destacar que en el caso de los hormigones de alta resistencia y de elevadas prestaciones el fenómeno de *spalling* es

Table 1: Structural damage in recent tunnel fires

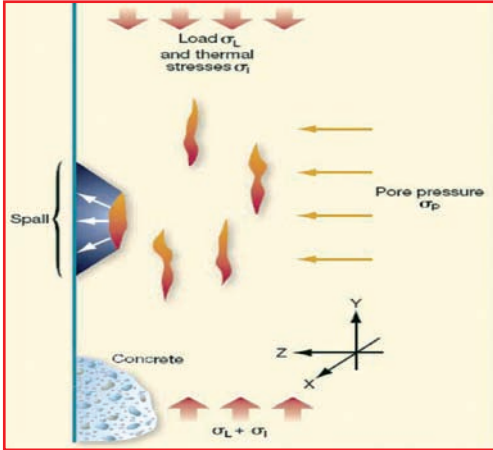
Tunnel (Year)	Concrete strength	Max temp	Fire duration	Length affected	Affect on segment
Great Belt (1994)	76MPa 28 day	800°C – 1,000°C	7hrs	16 segment rings (1.65m long) damaged in crown	Peak of spalling 270mm
Channel (1996)	110MPa mature	1,100°C	9hrs	500m with 50m severely affected by spalling	Up to 100% (400m) of thickness spalled showing grout
Mont Blanc (1999)	Not reported	1,000°C	50hrs	900m – tunnel crown most affected	Serious damage to tunnel structure

[Figura 1].- Resumen de daños estructurales de los eventos más recientes de incendios en túneles.

Incremento Temperatura Vs Degradación del Hormigón



[Fig. 2].- Incremento Temperatura vs Degradación del Hormigón.



[Figura 3] Ejemplificación gráfica del fenómeno de "spalling".



Objetivo de la Protección Pasiva del Hormigón al Fuego

El principal objetivo que debe ser cumplido por cualquier protección pasiva del hormigón contra el fuego es la de evitar la pérdida de vidas humanas logrando que las características mecánicas de los elementos estructurales se con-

dos tipos de curvas (Fig. 5) que pueden ser utilizadas:

- Estándar (Para intensidades de fuego baja):

$$T = 345 \cdot \log_{10}(8t + 1) + 20$$

- Hidrocarburos (para Fuegos de mayor intensidad):

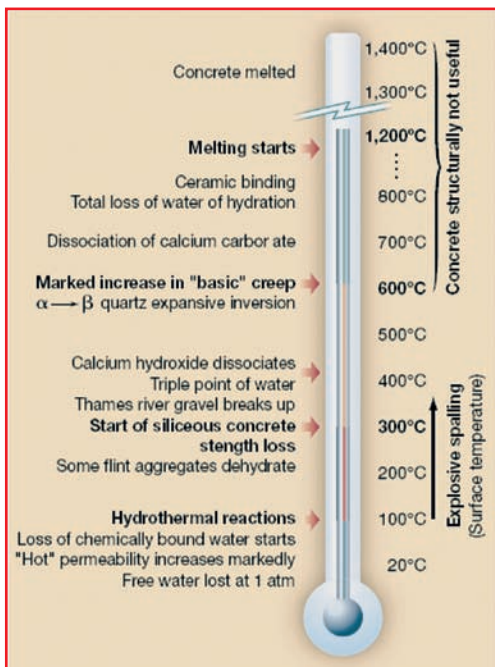
$$T = 1080 \cdot [1 - 0,325 \cdot e^{-0,167t} - 0,675 \cdot e^{-2,5t}] + 20$$

Donde:

t : es el tiempo desde el inicio del ensayo (en min).

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

Otras propuestas de curvas de calentamiento han sido propuestas por otros códigos como el Holandés, el Danés, y la ISO (Fig. 6).

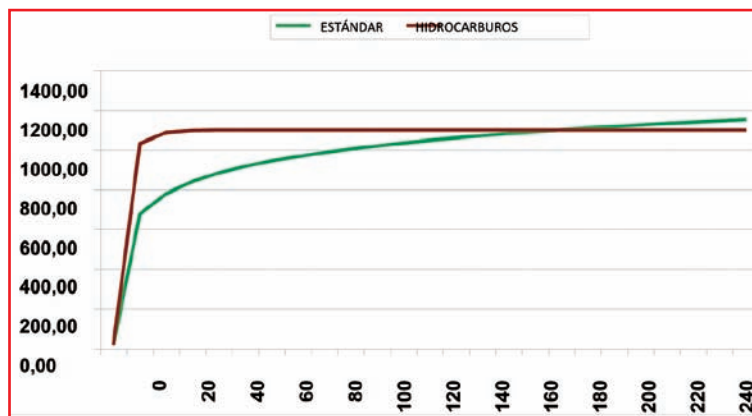


[Figura 4].- Reacción físico química de la estructura del hormigón vs. el incremento de la temperatura.

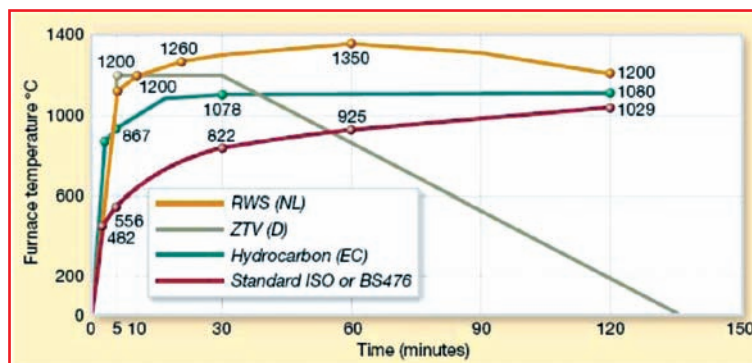
más pronunciado debido a las altas presiones que se producen dentro de estructuras más compactas y cerradas, como las de estos hormigones habitualmente usados en revestimiento final de túneles, ya sea con segmentos prefabricados o en revestimiento convencional.

La intensidad del fuego dependerá de la naturaleza del material que lo origina. Por tanto, en el momento de diseñar una protección contra el fuego para el hormigón deberá considerarse el tipo de vehículos y/o materiales que transitarán por el túnel.

Existen varias curvas de calentamientos propuestas por diversas normativas, dándole al proyectista la oportunidad de seleccionar la curva que se adapte a la situación del túnel. La Norma Europea EN 1363-1-2/1999 define



[Figura 5] .- Ejemplo de curvas de calentamiento según Norma Europea EN 1363-1-2/1999.



[Figura 6] .- Comparación de curvas de calentamiento para diversos códigos Europeos.

serven estables durante el proceso de evacuación del túnel y actuación de los bomberos.

Las características estructurales que deberán ser aseguradas por la protección pasiva son:

- Conservación de la capacidad portante.
- No emisión de gases inflamables en la cara expuesta.
- Evitar la disipación de las llamas o los gases.
- Aislamiento térmico hacia el interior del elemento estructural.

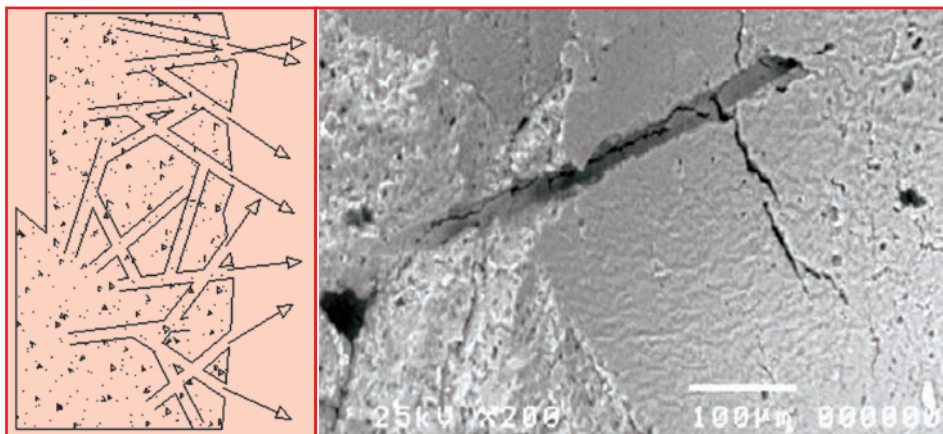
Se puede concluir entonces, que toda *protección pasiva* contra el fuego del hormigón deberá jugar un papel importante en los primeros minutos en que se produce el incendio, pues es durante estos momentos que la evacuación de las personas se realizará y los bomberos intentarán extinguir las llamas. Como puede ser observado en la figura de deterioro del hormigón vs. incremento de la temperatura, es al problema del *Spalling* al que se deberá prestar mayor atención por ser este el principal deterioro que el hormigón sufrirá durante los primeros minutos del incendio.

A pesar de que actualmente no exista una normativa para ensayos de resistencia al fuego para hormigones en túneles, se recomienda utilizar la normativa europea *EN 1363-1 y 2 (2000)* de ensayos de resistencia al fuego, en la que se describen los procedimientos para realizar dichos ensayos.

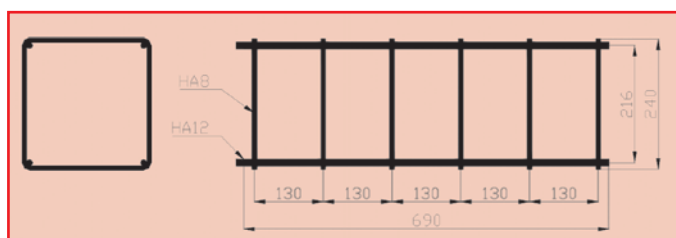
Fibras de Polipropileno como Protección Pasiva del Hormigón contra el Fuego

Recientes investigaciones llevadas a cabo han llegado a la conclusión que el agregar a la matriz micro-fibras de polipropileno (tipo mono-filamento y diámetros menores a $32 \mu\text{m}$) reduce significativamente el fenómeno de *spalling* en el hormigón durante un incendio. Existe una relación directamente proporcional entre el número de fibras incorporadas a la matriz y la mejora del comportamiento del hormigón ante el fuego.

El mecanismo por el que las fibras de polipropileno contribuyen a reducir el fenómeno de *spalling* es simple. En el momento que se alcanzan los 160°C las fibras de polipropileno se derriten reduciendo el volumen que ocupan. Al alcanzarse los 360°C el polipropileno se evapora creando una serie de conductos en el interior de la matriz que llegan hasta la superficie. Parte de estos gases son liberados en la atmósfera por medio de los pequeños canales que se crean debido a la *desaparición* de las fibras. Estos pequeños conductos son utilizados también por los gases que se producen por la evaporación del agua interna en el hormigón, reduciendo así la presión que se produciría evitando el *desconche* de las capas superficiales (*Fig. 7*).



[Figura 7] .- Vía de escape de los gases dentro de la matriz.



[Figura 8] .- Detalle del elemento prismático evaluado, con un recubrimiento del hormigón sobre el acero de 30 mm. Todas las medidas están en mm.

Existen distintas opiniones sobre la cantidad de fibras que deben ser incorporadas en la matriz para ofrecer una eficaz protección. Cuanto mayor sea el número de fibras, mejores resultados se obtienen. Las recomendaciones van desde $0,6 \text{ kg/m}^3$ de hormigón hasta $2,0 \text{ kg/m}^3$ de hormigón, dependiendo de la calidad del hormigón, pues en hormigón de alta resistencia es necesaria una mayor protección al fuego.

Presentamos (*Figs. 8, 9 y 10*) un resumen experimental de probetas, idénticamente armadas, sometidas a la curva de calentamiento propuesta por la norma *EN 1363-1-2/1999*.

Fueron ensayadas probetas diversos tipos de fibra:

- Mezcla normal de hormigón sin la inclusión de fibras.
- Mezcla con inclusión de fibras de polipropileno.

Fueron evaluados los diferentes comportamientos en las diferentes etapas de la curva de calentamiento propuesta por la norma *EN 1363-1-2/1999*, y evaluadas las pérdidas de masa de material a lo largo de la misma, obteniendo excelentes resultados con la inclusión de fibras logrando el objetivo final de mantener la integridad del elemento por un tiempo prudencialmente correcto para garantizar la posibilidad de evacuar las estructuras que estén sometidas a un incidente de fuego.

Caso de fibras de polipropileno

En el ensayo de probetas con fibras de polipropileno se ha podido observar un adecuado desempeño durante toda la curva de ca-



[Figura 9] .- Fibra de polipropileno para protección contra el fuego.



[Fig. 10] .- Ejemplo de probeta empleada en los ensayos dentro del horno de pruebas.



[Figura 11].-
Muestra del material con la aplicación de fibras de polipropileno. Muestra luego de haber finalizado el ensayo.



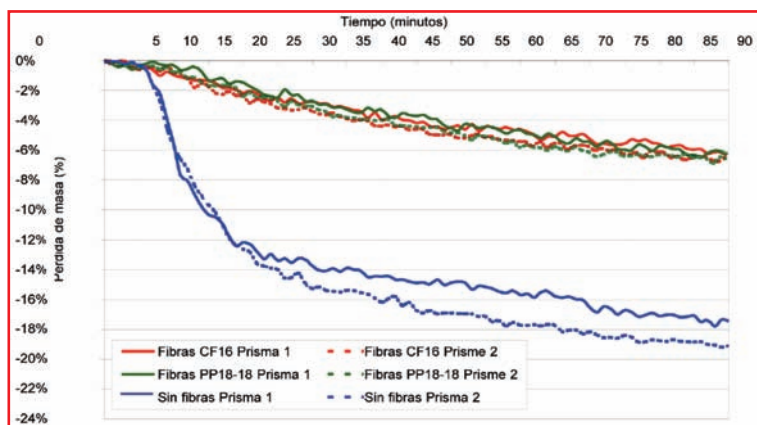
[Figura 12].-
Muestras ensayadas con fibras de polipropileno. Obsérvese el lagrimeo superficial por pérdida del agua y vapor.



[Figura 13].-
Ejemplo de las probetas ensayadas sin ningún tipo de fibra.



[Figura 14].-
Ejemplo del material desprendido por el spalling durante el ensayo de probetas sin inclusión de fibras.



[Figura 15].-
Gráfico de comparación de pérdida de masa para las probetas estudiadas.

lentamiento, con una mínima pérdida de masa, producto de las reacciones físico químicas ya explicadas anteriormente. Se observa un **casi nulo efecto** de *spalling* en la misma (Figs. 11 y 12).

Caso de probetas sin fibra

Es evidente el grado de degradación que la estructura alcanza sin ningún tipo de protección. Durante la realización de este proceso experimental se puede observar el comienzo del *spalling* durante los primeros 3 a 8 minutos del ensayo, con pérdidas significativas de masa adicionales a las que se pueden prever por pérdida del agua o vapor producido por el calentamiento del material (Figs. 13 y 14).

Resumen

A continuación como resumen para ejemplificar un comparativo de pérdida de masa entre las 2 tipologías ensayadas se muestra el gráfico de la Fig. 15 de pérdida de masa.

La protección de estructuras de hormigón contra el fuego mediante el uso de microfibras de polipropileno constituye una solución efectiva para obras nuevas, y por esto el énfasis en especificar este tipo de soluciones en los proyectos de obras subterráneas, al ser estos proyectos de importancia económica, social y política en todos los países donde se construyen, y donde cualquier fracaso ó incidente negativo tendría consecuencias irreversibles.



Ejemplo de ensayo a escala real: sin fibra y con 2 kg/m³ de fibra de polipropileno.

Lo expuesto en este documento muestra pruebas con materiales del portafolio Maccaferri y A. Bianchini Ingeniero, S.A.. Cada proveedor debe demostrar el comportamiento adecuado de sus productos con las curvas de calentamiento previstas en la especificación del proyecto.



BIANCHINI INGENIERO
Diputación, 279 - 1º •
080007 Barcelona.
☎: 934 961 300
Fax: 934 961 301
Web: www.bianchini.es