

Desarrollo de dovelas de hormigones reforzados con fibras no metálicas de alta durabilidad y sostenibilidad

Innovative non-metallic structural fibre reinforced concrete tunnel segments of high durability and improved sustainability

Janill De la Cruz ^a, Paz Navarro ^b, María N. Sánchez ^c, Elena Martín ^d, Ignacio Segura ^e, Albert de la Fuente ^f

^aIngeniera de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Catalunya UPC. janill.de.la.cruz@upc.edu

^bIngeniera de Caminos, Canales y Puertos. gGravity Engineering. pnavarrog@ggravityeng.com

^cC.C.Q.Q. gGravity Engineering. mnsanchezp@ggravityeng.com

^dIngeniera de Caminos, Canales y Puertos. Dragados emartind@dragados.com

^eProf. Dr. C.C.Q.Q. Universidad Politécnica de Catalunya UPC. ignacio.segura@upc.edu

^fProf. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Catalunya UPC. albert.de.la.fuente@upc.edu

RESUMEN

Esta investigación se ha orientado a los aspectos mecánicos y de durabilidad de hormigones reforzados con fibras no metálicas para dovelas de túneles. Se han abordado los requerimientos de resistencias residuales a flexotracción, durabilidad, respuesta frente a fuego, así como los procedimientos de control tanto durante la fase de fabricación como durante la fase de colocación. Los resultados abren la puerta para que este nuevo tipo de dovelas para el revestimiento de túneles se implemente a nivel mundial en futuros túneles.

ABSTRACT

This research was focused on both mechanical and durability aspects related non-metallic reinforced concrete oriented to be used in tunnel precast segments. Aspects as post-cracking flexural strength of the FRC, durability, response against fire, as well as quality control procedures during production and its final manufacturing process. The results confirming that this technology will be implementable in short-term worldwide.

PALABRAS CLAVE: dovelas de túneles, fibras no metálicas, durabilidad, fuego, temperaturas extremas, TBM.

KEYWORDS: tunnel segments, non-metallic fibres, durability, fire, extreme temperatures, TBM.

1. Introducción

El hormigón reforzado con fibras (HRF) es una alternativa posible al hormigón armado tradicional para la prefabricación de dovelas para el revestimiento de túneles excavados con tuneladora (túneles TBM). Además, su uso como

material estructural ha sido aceptado por varias normativas nacionales, incluso por el *fib* Model Code (2010) [1]. El uso de HRF en dovelas conduce a ventajas técnicas y económicas, prueba de ello es el uso de fibras estructurales en

sustitución parcial o total del armado en más de 70 túneles construidos con tuneladora en los últimos 20 años, o actualmente en construcción.

En este contexto, las exigencias de durabilidad (vidas útiles superiores a 120 años en condiciones de exposición altamente agresivas) y la natural competitividad existente en el mercado de la construcción, conduce a que se deba estudiar la idoneidad de otros tipos de refuerzos distintos a los basados en el acero (fibras y/o barras), fibras no metálicas, para dar respuesta a estas exigencias. Sin embargo, las normativas de referencia para el diseño de túneles aún no cubren otros tipos de fibras. Con el fin de dar respuesta a este vacío y plantear soluciones técnicamente factibles para el refuerzo del hormigón más durables y sostenibles, se ha desarrollado el proyecto de investigación DURADOV (RTC-2015-3617-4). En este contexto, se han caracterizado estos hormigones (y dovelas) en aspectos mecánicos, de durabilidad y de respuesta bajo temperaturas extremas (congelación y fuego).

2. Nuevos conceptos de fibras y mezclas de hormigón

El hormigón reforzado con fibras sintéticas, como el PFRC, se ha convertido en un material especialmente atractivo en los últimos años. Este tipo de fibras son un refuerzo relativamente económico e incluso una alternativa a las fibras de acero, pues éstas pueden corroerse y producir un rápido deterioro de la matriz compuesta [2]. Por otra parte, el hormigón reforzado con fibras de vidrio tiene las ventajas de ser ligero, de alta resistencia a compresión y de alta resistencia a flexión. Además, en los últimos años, se han desarrollado GFRC resistentes a los álcalis que resuelven el problema de la corrosión [3].

2.1 Formulación del hormigón

El hormigón para dovelas con fibras no metálicas, debe cumplir los requisitos de un

hormigón de alta resistencia y durabilidad determinada. Es necesario que las fibras se acoplen bien en la mezcla para conseguir que esta sea trabajable y pueda ponerse en obra adecuadamente. En cuanto a los áridos, es necesario diseñar una mezcla en la que se consigan curvas de áridos continuas y compactas, para obtener altas resistencias en el hormigón. En el caso de las dovelas la consistencia de puesta en obra debe ser seca-plástica, ya que la forma de los moldes y el vibrado enérgico que sufre el hormigón no permite colocarlo con consistencias más blandas.

Con el objetivo de evaluar la influencia de las fibras en la respuesta estructural, se ha evaluado un hormigón de alta resistencia (AR) con diversos tipos de fibras. De este modo, se abarcan las diferentes casuísticas que se pueden encontrar a nivel de características de la matriz cementicia en la producción de dovelas de hormigón. La Tabla 1 presenta las dosificaciones empleadas durante la campaña experimental.

Tabla 1. Dosificaciones empleadas en la Campaña experimental

Componente	Dosificación [kg/m ³]
Arena 0/4	860
Árido 4/10	440
Árido 10/20	490
Agua	168
CEM I/52.5 R	420
MasterPozzolith 7003	-
MasterGlenium SKY 886	-
MasterGlenium UG 1323	3.15
Relación a/c	0.4

Tabla 2. Características de las fibras

¹PO: Poliolefina; POM: Poliolefina modificada; PP: Polipropileno; PE: Polietileno; FV: Fibra de Vidrio.

Hipót.	Material ¹	L [mm]	d _{eq} [mm]	l/d _{eq}	ft [MPa]	E [GPa]
PP1	PO	60	0.92	65	560	20.5
PP2	PO	48	0.77	62	550	n.d.
PP3	PO	53	0.48	115	613	5.4
PP4	POM	48	0.91	53	640	10
PP5	PP	60	0.48	125	640	12
PP6	PO	40	0.75	53	448	3.6
PP7	PO	60	0.79	77	300	2.1
PP8	PP+PE	51	0.66	77	650	9.5
FV2	PO+FV	40	1.2	33	600	n.d.

Para la presente investigación se ha empleado el CEM I 52.5R conocido como un material de una resistencia muy elevada de 52.5 MPa a 28 días y de resistencia inicial elevada R, con contenidos de 420 kg/m³. En cuanto al esqueleto granular se han empleado áridos calizos diseñados con mezclas que sean capaces de crear curvas de áridos continuas, de máxima compacidad.

2.2 Selección de fibras

Existe una alta variedad de fibras, pudiendo variar su material, geometría y propiedades. Para llevar a cabo la presente investigación, se ha realizado una selección de macro fibras estructurales para ser utilizadas en los ensayos. Las fibras empleadas para la fabricación de los hormigones proceden de diferentes orígenes: derivadas de la poliolefina (8 tipo de fibras) y del vidrio (1 tipo de fibra). La Tabla 2 presenta las propiedades de cada una de ellas.

3. Comportamiento fenomenológico del HRF

A la hora de analizar el comportamiento del hormigón reforzado con fibras, surgen incertidumbres sobre el comportamiento que se debe esperar, y sobre todo cómo contribuyen cada uno de los componentes. Por tanto, teniendo en cuenta que se está hablando de HRF, los materiales que lo componen serán los que confieran el comportamiento mecánico al compuesto.

En el caso del hormigón, el comportamiento a tracción o a flexotracción se debe al comportamiento mecánico que pueda tener la pasta de cemento y los áridos, es decir, depende de la naturaleza de los materiales que lo componen, que en este caso son materiales frágiles. En el caso de las fibras embebidas en el hormigón, hay que tener en cuenta que el comportamiento del hormigón no será el mismo

que tiene el hormigón reforzado con una barra de acero o si se tuviera sólo una fibra embebida.

Es sabido que el uso de las fibras estructurales en el hormigón conduce a una mejora del comportamiento resistente de la matriz cuando está sometida a tensiones de tracción [3-5].

La Figura 1 presenta la gráfica de un hormigón reforzado con fibras, sometido a flexotracción, donde se puede observar que cuando se inicia la carga, el hormigón es el que toma dicha carga, y por tanto el trabajo de la fibra durante esta fase se considera mínimo o nulo, luego cuando la matriz de hormigón se comienza a fisurar empieza a transmitirle carga a las fibras, hasta que finalmente son las fibras las que prácticamente absorben la totalidad de las tensiones.

La Figura 1 demuestra que la tensión del hormigón reforzado con fibras es, la suma de la contribución del hormigón y la contribución de las fibras. La superposición de cada uno de estos fenómenos refleja la creciente contribución de las fibras tras la rotura de la matriz de hormigón hasta una tensión residual máxima que está condicionada por la interacción entre los materiales. Dicha interacción suele inducir una pérdida de adherencia y una reducción de la resistencia del conjunto formado por hormigón y fibra. A partir de ese punto se aprecia una tendencia de estabilización de la respuesta mecánica obtenida.

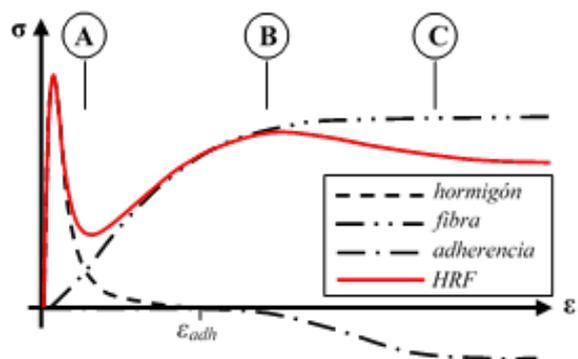


Figura 1. Comportamiento de hormigón en masa, fibra y la interacción entre ambos materiales [7]

Tras una pérdida instantánea de rigidez debido a la fisuración, en el punto A se inicia la contribución de las fibras, lo que supone un incremento de la carga resistida para un determinado ancho de fisura respecto a las vigas sin fibras. La contribución de las fibras crece hasta el punto B, momento en el que las fibras alcanzan su máxima eficiencia (o máxima contribución). El punto B, la pendiente del tramo (A-B), está gobernada por el tipo y cuantía de fibra. A partir del punto B las fibras pierden adherencia y deslizan, lo que se traduce en una reducción del incremento de carga respecto a las vigas sin fibras hasta que se estabiliza a partir del punto C, cuando las fibras pasan a trabajar bajo un mecanismo de debonding y pull-out.

3.1 Resistencias exigidas en dovela de HRF en túneles

A pesar que la aplicación de cargas concentradas induce a un estado complejo de tensiones, donde su magnitud como su distribución es considerada difícil de evaluar, se ha comprobado que el empleo del HRF en dovelas puede ser utilizado bajo a cargas concentradas [8]. Cada proyecto establece unas resistencias mínimas a compresión a cumplir en las distintas fases de fabricación (desmoldeo, preacopio, volteo y acopio) y en fases de transporte y colocación final. Según las recomendaciones de la ITA, *International Tunnel Association* [9] se establecen unos valores orientativos: La resistencia a compresión a edades tempranas (desmoldeo, preacopio y manipulación) en torno a los $f_{ck} > 12$ MPa. A los 28 días una resistencia habitual ≥ 40 MPa y a 90 días ≥ 50 MPa. En cuanto a la resistencia a tracción exigida a partir de las diversas normativas, varía de los 4 MPa a los 5 MPa. La resistencia a flexotracción suele exigir para el límite de proporcionalidad (f_{lop}) un mínimo de 4-5 MPa y para las aperturas de fisuras del orden de 2.5 y 3.5 mm, resistencias residuales alrededor de 3-4 MPa. Estas variaciones dependen de la normativa empleada ya sea Europea o Americana.

3.2 Campaña Experimental y Resultados

En este apartado se presentan los detalles principales de la campaña experimental realizada, para determinar las propiedades mecánicas de los hormigones reforzados con fibras no metálicas (HRFnM). Se ha llevado a cabo una campaña experimental con un total de 12 series correspondientes a las dosificaciones y fibras mostradas en la Tabla 1 y Tabla 2. La nomenclatura empleada para la tipificación de los hormigones fabricados se presenta a continuación: T_Cf_Tf , donde T es el indicativo del tipo de hormigón utilizado, Cf el contenido de fibra empleado y Tf es el indicativo del tipo de material de fibra empleado. Se han realizado ensayos de propiedades del hormigón en trabajabilidad (UNE-12350-2) [10], de resistencia a compresión (UNE-12390) a 7 y 28 días, [11] módulos de elasticidad (UNE12390-13) [12] y ensayos de flexotracción (UNE-14651) [13]. Todas las amasadas han presentado consistencia seca-plástica de asentamientos de 8 a 1 cm, similar a la de puesta en obra debido a que la forma de los moldes y el vibrado enérgico que sufre el hormigón no permiten colocarlo en consistencias más blandas. En cuanto a la resistencia a compresión (f_{cm}) a los 7 y 28 días, presentan resistencias mayores a los 45 MPa y 56 MPa respectivamente, cumpliendo con las exigencias mínimas de diseño.

Tabla 3. Nomenclaturas de las dosificaciones y contenido y tipo de fibra específico

Tipo de hormigón empleado	Tipo de fibra	Cont. de fibra [kg/m ³]	Código
Hormigón Alta Resistencia (AR)	PP1	8	AR_08_PP1
	PP2	8	AR_08_PP2
	PP3	8	AR_08_PP3
	FV2	20	AR_20_FV2
	PP1	10	AR_10_PP1
	PP2	10	AR_10_PP2
	PP3	10	AR_10_PP3
	PP4	10	AR_10_PP4
	PP5	10	AR_10_PP5
	PP6	10	AR_10_PP6
	PP7	10	AR_10_PP7
	PP8	10	AR_10_PP8

El módulo de elasticidad presenta valores entre 36 y 39 GPa. Observándose que el tipo de fibra y contenido no influye de forma significativa en la resistencia a compresión ni en el módulo de elasticidad.

3.2.1. Comportamiento Post-fisuración

Con el fin de evaluar la repercusión de la incorporación de fibras en el aumento de la resistencia residual por las probetas prismáticas en flexotracción, se analizan los resultados de todas las series de hormigón de AR ensayadas. El ensayo se realiza empleando un clip para determinar la apertura de fisura *CMOD Crack Mouth Opening Displacement*. Los resultados recogidos en la Figura 2 confirman que las fibras derivadas de la poliolefina conducen a mayores prestaciones mecánicas que las de vidrio. Las fibras derivadas de la poliolefina presentan una resistencia residual a flexotracción en el rango de 1.79-3.12 MPa con apertura de fisura 2.5 mm (f_{r3}) y $f_{i,OP}$ de 3.93-4.09 MPa con una dosificación de 8 kg/m³, mientras que la fibra de vidrio contiene una resistencia de (f_{r3}) de 0.95 MPa y para el $f_{i,OP}$ de 4.82 MPa.

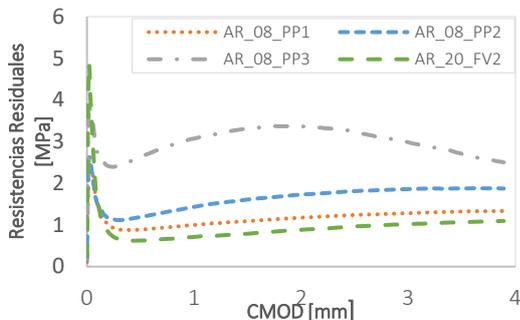


Figura 2. Curva resistencia-CMOD con 8 y 20 kg/m³

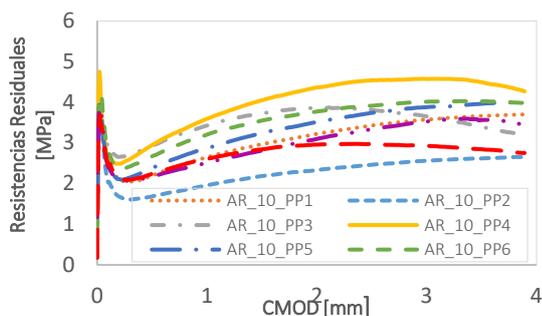


Figura 3. Curva resistencia-CMOD con 10 kg/m³

La Figura 2 evidencia que el AR_08_PP3 presenta las mejores resistencias residuales a pequeñas aberturas de fisura (0.5). Este comportamiento se deriva a la geometría y textura de la fibra, al ser una fibra de gran esbeltez, permite alcanzar alta resistencia residual; sin embargo, al tratarse de su textura (sin relieve), provoca una pérdida de adherencia y por consiguiente una pérdida de resistencia residual a mayores aberturas de fisuras. Por lo general, estos resultados de resistencia residual eran bajos teniendo en cuenta las exigencias de los proyectos analizados, por lo que se decidió aumentar el contenido de fibras a 10 kg/m³ y descartar el uso de la fibra de vidrio.

Según puede verse en la Figura 3, a partir de cada tipo de fibra se observan distintas tendencias. Las amasadas correspondientes a las fibras PP4 y PP6, presentan las mejores resistencias residuales, con tendencia a presentar mejores resistencias residuales a mayores aberturas de fisura. A los 0.5 mm de apertura de fisura se alcanza un valor de 2.89 y 2.63 MPa respectivamente, y al llegar a los 3.5 mm de apertura se incrementa la resistencia residual hasta los 4.41 y 3.97 MPa respectivamente. Este comportamiento residual, responde a la geometría y textura de la fibra, siendo estas fibras las de mayor diámetro equivalente.

En el caso de las amasadas correspondientes a las fibras PP1, PP5 y PP7, presentan un comportamiento postfisuración similar a las amasadas PP4 y PP6 pero con menores resistencias residuales. Estos comportamientos parecidos en las fibras derivadas de la poliolefina, se deben a la similitud en sus propiedades técnicas de las fibras como la textura, diámetro equivalente, etc. Estos tipos de fibras cumplen la tendencia esperada, si aumentamos el tamaño de la sección transversal de la fibra vamos a perder la respuesta inicial entre 0.5 y 1, pero la tendencia es a aumentar a mayores aberturas, dependiendo de la adherencia que proporcione la fibra. Todas las fibras cumplen con los requisitos mínimos de

diseño exceptuando las fibras PP2 y PP8, las cuales no han llegado a los requisitos mínimos.

4. Estudios de durabilidad en macrofibras sintéticas

La aparición de fibras no metálicas de alto módulo elástico en el mercado constituye un destacado reto dentro del ámbito del HRF. Algunas fibras no metálicas ofrecen actualmente grandes prestaciones y, además de ser económicas respecto a otras fibras, son en general químicamente inertes y muy estables en el medio alcalino que supone el hormigón, lo que las convierte no solamente en una posible solución estructural, sino que pueden permitir una reducción de costes y recursos asociados a la construcción con destacadas mejoras en cuanto a la durabilidad (aumentando la vida útil de la estructura).

Con la finalidad de evaluar la durabilidad en las macrofibras sintéticas estudiadas en el apartado anterior, se ha realizado una campaña experimental en la cual han sido sometidas a siete ambientes agresivos. Para ello, se determinan las propiedades mecánicas básicas y se determinan las características físico-químicas superficiales de las fibras. Esta caracterización se realiza tanto para el estado inicial no degradado, como tras someter a los hilos madre a degradación en diferentes ambientes.

4.1 Evaluación de la durabilidad

La Tabla 4 detalla los diferentes ambientes que se han utilizado para evaluar la durabilidad de las diferentes fibras no metálicas. Para la duración de las disoluciones agresivas empleadas en las muestras (hilo madre), se han establecido tiempos de 1 a 60 días. Según estudios de la literatura técnica, un máximo de 60 días de ataque, sería más que suficiente para determinar la evaluación de la durabilidad. Para este estudio se establecen tiempos de: 1, 3, 5, 7, 15, 30 y 60 días de degradación. El procedimiento consiste

en preparar las disoluciones a diferentes concentraciones expuestas en la Tabla 4.

Tabla 4. Disoluciones Agresivas a emplear en las fibras

Tipo de ataque Químico	Medio	Concen.	Nomen.	Dur.
Sales	Cloruros	0.03	NaCl	1-60d
	Magnesio	0.05	MgSO ₄	
	Sulfatos	0.05	NaSO ₄	
Ácidos	Clorhídrico	0.1	HCl	
	Sulfúrico	0.05	H ₂ SO ₄	
	Acético	0.05	CH ₃ COOH	
Básico	Alcalis	1M	NaOH	

Las fibras deben sumergirse en cada una de las disoluciones y deben mantenerse en una cámara climática a temperatura de ensayo 20°C exceptuando el medio SOSA el cual debe estar en un horno a temperatura de 40°C. Se realizan ensayos de resistencia a tracción, módulo elástico y finalmente el ensayo de microscopia electrónica de Barrido (SEM).

4.2 Evaluación de las propiedades mecánicas y físicas

Analizando los resultados no se aprecia degradación importante en ninguna de las muestras. A continuación, se expone como ejemplo alguno de los resultados obtenidos durante los ensayos. En cuanto a las propiedades mecánicas, la Figura 4 y Figura 5 presentan los resultados de la resistencia a tracción y módulo de elasticidad tras la exposición al ataque químico básico (hidróxido de sodio), también conocido como sosa cáustica (NaOH).

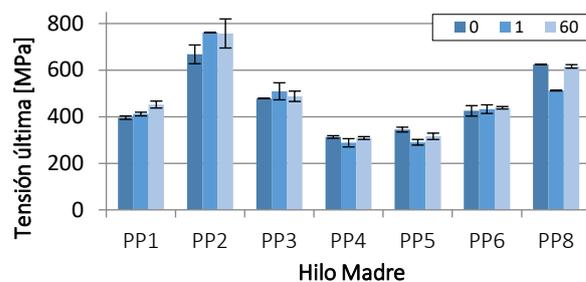


Figura 4. Tensión última de las fibras sometida al ataque básico: Hidróxido de sodio (NaOH) a edades de 0, 1 y 60 días.

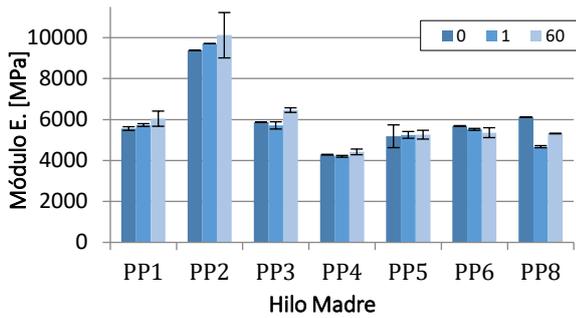


Figura 5. Módulos de elasticidad de las fibras sometida al medio básico: Hidróxido de sodio (NaOH) a edades de 0, 1 y 60 días

Las variaciones en la resistencia a tracción y módulo de elasticidad presentan una variación porcentual menor al 10% con respecto a los 60 días de ataque.

Estas diferencias a pesar de parecer considerables, pierden importancia cuando se analiza la variación porcentual tras 1 día de ataque; donde en el peor de los casos, la muestra (PP8) presenta la mayor disminución de tensión con un 18%, mientras que a los 60 días de ataque la disminución es del 1% (ambas respecto a la muestra sin atacar).

En definitiva, estos porcentajes en las tensiones ponen de manifiesto que, no son característicos para catalogar una degradación en las muestras sometidas al ataque por hidróxido de sodio.

Las muestras PP1 no presentan degradación superficial importante tras 60 días de ataque. Sí que para las condiciones alcalinas (NaOH, 1M) se observan deposiciones de partículas, así como una mínima degradación superficial. Sin embargo, esta posible degradación pierde credibilidad al compararla con la influencia de la tensión última, donde en este caso tras ser atacada no se ha visto influencia en la resistencia a tracción.

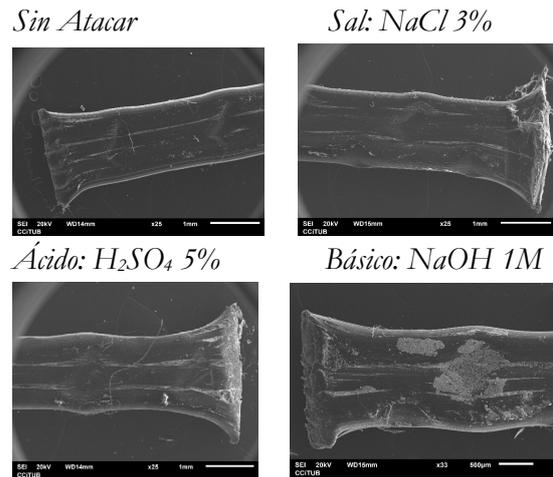


Figura 6. Micrografías electrónicas SEM de la fibra PP1 sin atacar, Sal: NaCl, Ácido: H₂SO₄ y Básico: NaOH.

5. Dovela a escala real

Una vez garantizado el estudio sobre la viabilidad de las macrofibras no metálicas y el estudio de durabilidad, surge la necesidad de realizar un estudio del elemento a escala real, de dovelas prefabricadas armadas únicamente con fibras estructurales para túneles excavados con máquina tuneladora.

Durante la campaña experimental se han fabricado cuatro dovelas a escala real, dos reforzadas únicamente con fibra derivada de la poliolefina (PP4) con un contenido de 10 kg/m³, y dos reforzadas con fibra metálica con un contenido de 40 kg/m³. Las dovelas presentan la geometría de un cuadrilátero, con unas dimensiones de 1717 mm de longitud media, 1205 mm de ancho y un canto de 200 mm. Las dovelas fueron fabricadas la planta de dovelas situada en Ottawa para la ejecución de la obra Combined Sewage Storage Tunnel (CSST Project).

El objetivo de esta campaña era analizar a escala real el comportamiento de dovelas sometidas a situaciones accidentales de incendio y carga exterior. Las dovelas se sometieron a las condiciones de incendio para determinar el posible desprendimiento de material (“spalling”) y para analizar también cómo afectaba éste al

comportamiento a flexión. Los ensayos realizados para estudiar el comportamiento en caso de incendios fueron el ensayo de fuego y el ensayo de flexión.

5.1 Ensayo con carga

Se trata de un ensayo de tres puntos, con la carga aplicada en el centro y en el que las dovelas están apoyadas en sus extremos. Antes del ensayo, si es necesario, los extremos de la dovela se cortan para lograr una superficie plana paralela a la losa de reacción. Para homogeneizar el contacto y reducir la fricción, se colocan diferentes materiales entre la dovela y la losa de reacción. Se han de colocar sensores de hilo en los laterales y el centro de la dovela, con la finalidad de controlar la apertura de fisura. La carga se aplica con un pistón hidráulico a mitad del vano. El pistón se mueve a una velocidad de desplazamiento constante de 0.9 mm/min hacia la losa de reacción.

5.2 Comportamiento a fuego

5.2.1. Características del comportamiento al fuego

La consideración del fuego y sus efectos sobre el material es de vital importancia. En este sentido, en la actualidad, en las guías de diseño existen herramientas de cálculo (curvas de fuego y modelos de análisis seccional) que permiten considerar esta acción particular a nivel de diseño de la estrategia de recubrimiento y del refuerzo.

Los proyectos de dovelas en general exigen cumplir con los siguientes requisitos: poder garantizar la resistencia residual una vez sometida al fuego, cumplir con la curva de fuego establecida, donde se permita el rescate y la evacuación de las personas y la intervención de los equipos de rescate sin riesgo de colapso estructural. Finalmente, verificar el criterio de fallo de las muestras ensayadas en una curva de fuego, en donde no se produzca un efecto *spalling* significativo en la superficie expuesta al fuego.

5.2.2. Ensayo de fuego

Las dovelas se han de exponer a un calentamiento unilateral, para simular el calentamiento que se produce a través de uno de sus lados cuando ocurre un incendio de un túnel. Para ello, las dovelas son colocadas sobre un horno, donde el calentamiento es sometido sobre la cara inferior de la dovela. Para aislar el interior del conjunto horno-dovela se coloca una espuma térmica en el contorno. Con la finalidad de medir las distribuciones de temperatura dentro de la dovela, se utilizan doce termopares (6 unidades en la zona interna y 6 termopares en la zona no expuesta).

La curva de fuego simulada en los ensayos es la curva de hidrocarburos del Eurocódigo-1, como la que se muestra en la Ecuación (1). Donde T es la temperatura y t el tiempo.

$$T = 20 + 1080 (1 - 0,325e^{-0,16t} - 0,67e^{-2,5t}) \quad (1)$$

Esta curva ha sido desarrollada para pequeños incendios de hidrocarburos y/o químicos, incluyendo los de las industrias offshore y petroquímica, en las que el fuego es a menudo menos contenido. Cabe decir que también se ha utilizado para túneles y estructuras. El ensayo completo tiene una duración de 420 minutos con una duración del fuego de 120 min.

Para ambas dovelas las curvas de fuego experimentales son prácticamente idénticas. Ambas curvas experimentales muestran temperaturas inferiores a la de la curva teórica del Eurocódigo-1 durante la fase de calentamiento. Sin embargo, tras 40 minutos, las curvas experimentales y teóricas se solapan a una temperatura constante de 1100°C hasta los 120 minutos en los que se inicia el enfriamiento. Por tanto, es razonable asumir que el daño sufrido por las dovelas es muy similar al que se obtendría en caso de haber empleado la curva teórica del Eurocódigo-1.

5.3 Resultados y Análisis

5.3.1. Inspección visual y medidas del spalling

Tras realizar los ensayos se hace un análisis visual para determinar la presencia de fisuras y desprendimientos (“spalling”) en las dovelas. Los desprendimientos se han medido en términos de profundidad respecto a la superficie original. En la Figura 7 y Figura 8 se muestran los detalles de la inspección visual realizada en ambas dovelas, y la Tabla 5 muestra los resultados de los desprendimientos medidos en los hormigones tras la realización de los ensayos de fuego.

Tabla 5. Desprendimiento en los hormigones tras finalizar los ensayos de fuego

Fibras metálicas (SFRC)		Fibras plásticas (PFRC)			
Máx [mm]	Min [mm]	Prom. [mm]	Máx [mm]	Min. [mm]	Prom. [mm]
104	5	32	43	6	19



Figura 6. Dovela de hormigón reforzado con fibras de acero sometida a fuego



Figura 7. Dovela de hormigón reforzado con fibras poliolefina sometida a fuego

En ambas figuras se muestra como la dovela ha perdido hormigón (efecto spalling) en la superficie en contacto al fuego. Las medidas de spalling en dovelas de hormigón con fibras metálicas confirman mayor profundidad media del daño. Esto se traduce en una reducción más severa del canto de la sección, por lo que el número de fibras que cosen una sección se verá reducido. Un comportamiento similar ha sido observado por [14].

5.3.2. Ensayo a flexión

La Figura 9 proporciona los resultados de los ensayos de flexión de las dovelas sometidas a fuego y en temperatura ambiente. Puede observarse, que la carga máxima obtenida por la HRFM sometida al fuego (85.08 kN) es apenas un 48.9% de la obtenida con la dovela sin haber sufrido un incendio (173.8 kN).

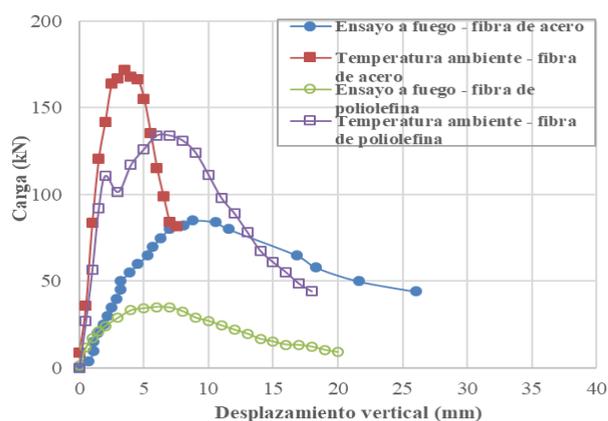


Figura 8. Resultados de los ensayos a flexión

Este descenso se entiende tanto por el deterioro del hormigón como por la reducción de canto debido al “spalling”. Se observa también una reducción de la rigidez antes de llegar a la carga máxima debido al fuego. Sin embargo, en las dovelas reforzadas con fibras de poliolefina, cuando se someten al fuego, la carga máxima (35.3 kN) supone tan solo el 26.2% de la obtenida sin incendio (134.7 kN). A pesar que los resultados con fibras plásticas presentan mejor comportamiento frente a spalling y una mayor reducción en cuanto a la respuesta residual, el ensayo pone de manifiesto un

comportamiento dúctil de las dovelas tras la fisuración.

6. Conclusiones

Este artículo recoge los resultados más relevantes de la caracterización mecánica, de durabilidad y temperaturas extremas de HRFnM. Se ha determinado que las dovelas HRFM presentan una solución ventajosa en términos estructurales y de durabilidad. Los resultados de la caracterización mecánica de hormigones reforzados con 10 kg/m³ de fibras derivadas de la poliolefina ponen de manifiesto que se alcanzan resistencias residuales a flexotracción adecuadas para el uso de este material en dovelas. Los resultados de los ensayos de durabilidad indican que la degradación del material no es significativa, manteniéndose las propiedades mecánicas similares a las iniciales. Finalmente, los ensayos a flexión en dovelas a escala real han puesto de manifiesto un comportamiento dúctil de las dovelas tras la fisuración; asimismo, los ensayos frente a fuego han conducido a resultados satisfactorios, observándose un menor deterioro en las dovelas de hormigón reforzados con fibras sintéticas, en comparación a aquellas reforzadas con fibras metálicas.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España por el apoyo financiero en el ámbito del proyecto I+D DURADOV (RTC-2015-3617-4). También reconocer la beca FI-AGAUR otorgada por la Secretaria d'Universitats i Investigació de la Generalitat de Catalunya. (Resolució ECO/1794/2015).

Referencias

- [1] FIB Model Code, "Fibre Reinforced Concrete. First complete draft," *International Federation for Structural Concrete, Switzerland*. 2010.
- [2] T. A. Söylev and T. Özturan, "Durability

, physical and mechanical properties of fiber-reinforced concretes at low-volume fraction," *Constr. Build. Mater.*, vol. 73, pp. 67–75, 2014.

- [3] M. A. and L. V, "Glass fiber reinforced cement," *BSP Professional*. 1991.
- [4] F. Laranjeira, "Design-oriented constitutive model for steel fiber reinforced concrete. Doctoral Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.," p. 2010, 2010.
- [5] A. de la Fuente, A. Blanco, and P. Pujadas, "Diseño óptimo de dovelas de hormigón reforzado con fibras para el revestimiento de túneles," *Sci. Direct*, 2014.
- [6] M. Di Prisco and G. A. Plizzari, "Fibre reinforced concrete: new design perspectives," *Mater. Struct.*, pp. 1261–1281, 2009.
- [7] P. Pujadas, "Caracterización y diseño del homigón reforzado con fibras plásticas," 2013.
- [8] A. Nogales and A. De, "Crack width design approach for fi bre reinforced concrete tunnel segments for TBM thrust loads," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 98, no. February, p. 103342, 2020.
- [9] I. Report, "ITATech Guidance for precast fiber reinforced concrete segments," *ITATech Act. Gr. Support*, vol. 1, no. April, 2016.
- [10] UNE-EN 12350-6:2009, "Determinación de la densidad," 2009.
- [11] UNE-EN 12390-3, "Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens," p. 20, 2009.
- [12] UNE-EN12390-13:2014, "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 13: Determinación del módulo secante de elasticidad en compresión.," p. 12390, 2014.
- [13] UNE-EN 14651:2007, "Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual)," 2008.
- [14] I. Kaundinya, "Protection of road tunnel linings in cases of fire," 2005.