

## Filamentos de Carbono en hormigones

José Vera Agulló ( *jveraagullo@acciona.es*) Javier Grávalos Moreno ( *jgravalo@acciona.es*)

ACCIONA Infraestructuras, Centro Tecnológico de I+D+i, Grupo de Materiales

### 1. Introducción:

El hormigón es un material clásico y su origen suele datarse a finales de la República Romana, aunque recientes investigaciones arqueológicas sitúan su origen en la época de las pirámides de Giza (3000-2500 AC) [1]. El desarrollo de este material (opus caementicium) durante el final de la República y durante todo el Imperio Romano supuso una auténtica revolución arquitectónica, permitiendo realizar unas obras de ingeniería nunca vistas hasta entonces (puentes, acueductos, puertos, anfiteatros...) y dar formas imposibles hasta la fecha a arcos, cúpulas y bóvedas (Figura 1). De hecho, la palabra hormigón procede del término formico, palabra latina que alude a la cualidad de «moldeable» o «dar forma». Además, el término concreto (usado en América latina) también es originario del latín: concretus, que significa «crecer unidos», o «unir». El hormigón es por tanto un ligante que se puede conformar fácilmente.



**Figura 1.** Panteón de Roma. Construido inicialmente por Agripa en 27 AC y reconstruido totalmente por Adriano en 126 DC. La bóveda está hecha de hormigón.

Desde sus orígenes, el hormigón ofrece un excelente comportamiento a compresión; no obstante, es un material frágil y con un comportamiento mediocre a tracción y a flexión. Este hecho limita de forma significativa sus posibles aplicaciones. Para remediarlo, los romanos ya empleaban fibras naturales como crin de caballo, mejorando de este modo, además de la resistencia a flexión y tracción, otras propiedades como la tenacidad, el módulo elástico, el comportamiento a fatiga, la resistencia al impacto y a la abrasión, la retracción o expansión y evitar la formación y propagación de grietas. No hubo mejoras significativas del hormigón romano hasta la revolución industrial, donde además de la producción industrial de cemento, se introdujo el uso de las armaduras de acero, dando origen al hormigón armado, que solucionaba parcialmente las limitaciones de este material a tracción y flexión.

En cuanto al refuerzo con fibras discontinuas, hubo avances significativos a finales del siglo XIX a raíz de la comercialización del amianto, dando lugar al llamado fibrocemento. Parecía un material perfecto debido a su reducido coste y a sus múltiples bondades: material aislante, buenas propiedades mecánicas, inerte a ataques químicos, resistencia al calor y al fuego. Desafortunadamente, con el tiempo se comprobó que tenía efectos adversos para la salud, y diversas legislaciones prohibieron su uso gradualmente durante la segunda mitad del siglo XX.

También a principios del siglo XX se comenzaron a

desarrollar fibras discontinuas de acero para reforzar el hormigón, pero no fue hasta la década de los 60 cuando se avanzó lo suficiente en este tema como para comenzar a aplicarlas a nivel industrial con éxito. La ventaja fundamental de este tipo de fibras es que confiere una elevada resistencia a tracción y flexión al hormigón a un coste razonable; y como principales desventajas cabe mencionar el ataque por ácidos y los problemas de corrosión. Actualmente es frecuente el uso de fibras de acero discontinuas como refuerzo de hormigones en numerosas aplicaciones: prefabricados, pavimentos, gunitados, estructuras de seguridad, revestimientos refractarios, etc.

No tuvieron tanto éxito los esfuerzos llevados a cabo en Rusia en la década de los 50 para aplicar fibras de vidrio discontinuas en el hormigón. Pronto se vio que su uso tenía efectos devastadores para la durabilidad del hormigón, debido a la reacción de los álcalis con las fibras. Desde entonces, se están desarrollando fibras de vidrio resistentes a los álcalis mediante el uso de zirconio. No obstante, el uso actual de las fibras de vidrio es bastante común en morteros y hormigones, pero se limita a revestimientos en fachadas, y no como refuerzo en hormigón en masa.

En las últimas décadas se ha producido un gran desarrollo en la producción de numerosos filamentos sintéticos (nylon, poliéster, Kevlar, carbono...). Los principales catalizadores de esta revolución en el desarrollo de fibras sintéticas son el sector aeronáutico y textil principalmente. Sin embargo, dada la imperiosa necesidad de aumentar las prestaciones a tracción y flexión del hormigón, estos filamentos sintéticos han sido testados como refuerzos en construcción; unos con más éxito que otros.

Entre estos filamentos sintéticos se encuentran las fibras de carbono, que fueron desarrolladas durante la década de los sesenta para la industria aeronáutica. Sus propiedades despertaron pronto el interés en el campo de la construcción, ya que recordaban a las de las conflictivas fibras de amianto usadas en el fibrocemento. En el presente artículo se exponen las principales ventajas de estas fibras en su aplicación como refuerzo en hormigones, haciendo también mención a sus importantes limitaciones económicas.

Además de sus aplicaciones como refuerzo, en los últimos años, están surgiendo a nivel de investigación nuevas aplicaciones multifuncionales para las fibras de carbono incorporadas en hormigones. La mayor parte de estas aplicaciones se basan en la conductividad eléctrica de este tipo de fibras y de los materiales compuestos de los que forma parte. Estas aplicaciones se comentarán en el apartado 4 del presente artículo.

Evidentemente el mundo de la investigación en construcción no se ha mantenido ajeno a la "revolución nano" acontecida en la última década. De hecho se viene organizando un congreso bianual desde 2003 dedicado a este tema: Nanotechnology in Construction (NICOM). En el presente artículo se comentan también las principales líneas de investigación en cemento que incorporan nanomateriales carbonosos en su estructura.

Por último, se anexa una breve reseña en la que se exponen las principales líneas de investigación que se están llevando a cabo en ACCIONA Infraestructuras en el campo de los materiales y que incorporan o son susceptibles de incorporar materiales carbonosos, tanto en matrices de hormigón como en otro tipo de matrices.

## 2. Filamentos de carbono discontinuos como refuerzo en hormigones

### 2.1. Fibras de carbono

Como bien saben los lectores de este boletín, actualmente se producen varios tipos diferenciados de fibras de carbono. Por un lado están las fibras de carbono de poliacrilonitrilo (PAN); estas fibras son producidas mediante la carbonización de un hilo de PAN a la vez que los cristales de grafito se van ordenando mediante un proceso conocido como hot-stretching. En función de la materia prima y de las condiciones de procesado, se obtienen fibras de alto módulo (HM) o de alta resistencia (HT). Por otro lado, se producen fibras de carbono obtenidas a partir de brea, tanto de petróleo como de mesofase. Este tipo de fibras son más económicas que las de PAN al ser el precursor más asequible. Se comercializan dos grados diferentes: las de uso general (GP), que son producidas a partir de brea isotrópica y las de altas prestaciones (HP), producidas a partir de brea de mesofase; evidentemente las HP tienen una resistencia a tracción y un módulo elástico superior a las GP.

En la Tabla 1 se muestran las principales fibras micrométricas utilizadas en morteros y hormigones, mostrando sus principales propiedades. Se puede comprobar que las excelentes propiedades mecánicas de las fibras de carbono solo son comparables con las fibras de amianto, las de vidrio, las de acero y la Kevlar (aramida). Las fibras de amianto quedan descartadas como competidoras, ya que no está permitido su uso en los países desarrollados; asimismo, las fibras de vidrio convencionales tienen graves problemas de durabilidad debido al ataque por álcalis y han de usarse fibras de vidrio modificadas (con  $ZrO_2$  o recubiertas de resina epoxi) que incrementan sustancialmente su coste. Las fibras de carbono y las de Kevlar tienen como ventaja respecto a las de

acero que son mucho más ligeras; pero tienen una gran desventaja: su elevado coste. Las fibras de carbono tienen más resistencia química que las de acero y aramida, pero su alargamiento último es sensiblemente inferior.

En la Figura 2 se esquematiza el mecanismo de rotura de los hormigones reforzados con fibras (FRC-Fiber reinforced concrete) en un ensayo a flexión. El aumento de la tensión máxima no suele ser muy significativo, excepto cuando se adicionan contenidos de fibra muy elevados. Sin embargo, se puede ver como la tenacidad aumenta sustancialmente con la incorporación de las fibras, o lo que es lo mismo, el material absorbe mucha más energía antes de que tenga lugar el fallo total de la estructura. Esto es muy importante en el caso de infraestructuras como puentes, ya que el fallo no es instantáneo y los daños pueden ser mitigados de forma considerable. La cantidad de fibra adicionada en cada caso suele determinarse mediante un balance económico en función de los requerimientos exigidos a la estructura.

- Hormigón Convencional
- FRC con porcentajes bajos en fibra
- FRC con porcentajes elevados de fibra

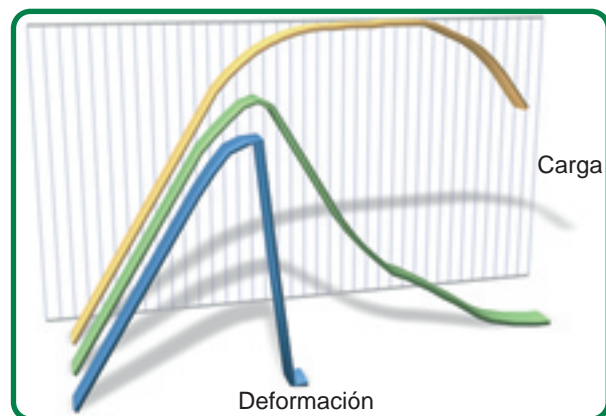


Figura 2. Gráfica cualitativa esfuerzo-deformación.

De entre los estudios de investigación referentes al uso de fibras de carbono en hormigones, cabe destacar un excelente trabajo de Morinobu Endo [3], en el que se ensayan a flexión hormigones realizados con 8 tipos de fibras de carbono de brea

Tipo de Fibra	Diámetro equivalente, $\mu\text{m}$	Densidad relativa	Resistencia a tensión, MPa	Módulo de elasticidad, GPa	Alargamiento último, %
Acero	5-1000	7.80	500-3000	210	3.5
Acero Inox	5-100	7.86	2100	160	3
Acrílico	13-104	1.16 - 1.18	270-1000	14-19	7.5-50
Asbestos	0.15-3	2.6	3000	200	2-3
Carbón PAN,HM	8	1.6-1.7	2500-3000	380	0.5-0.7
Carbón PAN,HT	9	1.6-1.7	3450-4000	230	1.0-1.5
Carbón Brea,GP	10-13	1.6-1.7	480-790	27-35	2.0-2.4
Carbón Brea,HP	9-18	1.8-2.15	1500-3100	150-480	0.5-1.1
Kevlar 29	12	1.44	2900	69	4.4
Kevlar 49	10	1.44	2350	133	2.5
Nylon	23	1.14	970	5	20
Poliéster	20	1.34-1.39	230-1100	17	12-150
Poliétileno	25-1000	0.92-0.96	75-590	5	3-80
Polipropileno		0.90-0.91	140-700	3.5-4.8	15
Sisal	0.2-0.4	1.2	400-800	30	3
Vidrio	9-15	1.9	2000	60	0.5
HORMIGÓN		2.3	5-8	30	0.02

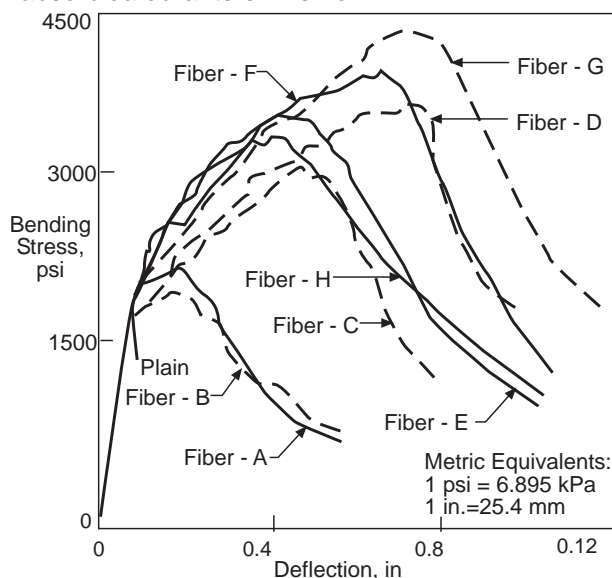
Tabla 1. Tipos de fibras utilizadas en morteros u hormigones. Principales propiedades [2].

diferentes, todas ellas de 1 cm de longitud y adicionadas a un 3% en volumen. En la Tabla 2 se muestran las propiedades mecánicas de todas las fibras utilizadas en el estudio.

Tipo de fibra	Resistencia a tracción, MPa	Módulo elástico, GPa	% de elongación
Fibra A	440	26,6	1,65
Fibra B	576	30,5	1,89
Fibra C	644	29,2	2,22
Fibra D	668	31,0	2,17
Fibra E	678	30,7	2,19
Fibra F	683	29,6	2,33
Fibra G	735	30,8	2,38
Fibra H	765	32,4	2,36

**Tabla 2.** Propiedades mecánicas de las fibras de carbono usadas en [3].

En la Figura 3 se muestran los resultados obtenidos por el grupo de Endo. Se puede comprobar que todas las fibras de carbono utilizadas mejoran significativamente la tenacidad del material compuesto, ya que la rotura está controlada por la presencia de fibras. Los materiales compuestos realizados con las fibras A y B son los que peor se comportan, lo cual es normal debido al salto que hay en cuanto a propiedades mecánicas de las fibras individuales. El resto de fibras duplican el esfuerzo máximo a flexión del hormigón sin reforzar. En este mismo estudio, el grupo de Endo comprobó mediante ensayos mecánicos de impacto que a mayor cantidad de fibras de carbono utilizadas, mayor era la resistencia al impacto y la energía absorbida durante el mismo.



**Figura 3.** Curvas del esfuerzo a flexión frente a la deformación de hormigón con un 3% en volumen de diversos tipos de fibra de carbono [3].

Las fibras de carbono discontinuas (chopped) se suelen comercializar en trenzas de unos 12000 filamentos. Dichas trenzas deben ser deshechas y los filamentos individualizados lo máximo posible antes de ser incorporados a la mezcla. Su posterior amasado con el hormigón suele ser pobre, y normalmente consiste en un camión hormigonera convencional. Por este motivo, es aconsejable el uso de aditivos que faciliten esta dispersión. Por ejemplo, Pu-Woei y col. [4] estudiaron el efecto del uso de metilcelulosa, látex y humo de sílice en la dispersión de fibras de carbono isotrópicas de 5 mm de longitud y 10  $\mu$ m de diámetro. La conclusión que obtuvieron fue que una combinación de metilcelulosa y humo

de sílice, junto con el uso de un reductor de agua, era el óptimo en cuanto a la dispersión de las fibras. La dispersión la cuantificaban a partir de la conductividad del material compuesto. Este estudio se realizó a nivel pasta de cemento, sin arena ni grava. Asimismo, el grupo de Endo [3], también observó que el uso de humo de sílice junto con un reductor de agua facilitaba la dispersión de las fibras de carbono en la matriz de cemento.

Si se adicionan porcentajes elevados de fibra de carbono (>1% en volumen) es aconsejable el uso de una amasadora especial más energética que la convencional, ya que los aditivos mencionados anteriormente no serían suficiente.

Junto con la dispersión, la interacción entre la fibra y la matriz de hormigón es un factor clave para la obtención de refuerzos mecánicos adecuados. Es común que las fibras de acero tengan formas angulosas (onduladas, corrugadas...) con el fin de anclarlas fuertemente en la matriz. Obviamente esto no puede realizarse en el caso de las fibras de carbono, debido a su flexibilidad. La alternativa es la modificación de su superficie, bien mediante funcionalización química bien por recubrimientos. El grupo de D.D.L. Chung llevó a cabo unos ensayos en los que se trataban fibras de carbono isotrópicas mediante diferentes agentes: O<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub>, NaOH, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y ácido acético [5]. Las conclusiones fueron clarificadoras, el tratamiento más efectivo con diferencia fue el ozono. Mediante este tratamiento se incrementó significativamente la concentración de oxígeno en superficie, bajando el ángulo de contacto del agua en las fibras a 0°. Debido a esta mejora en la mojabilidad de las fibras, mejoró la adherencia de las fibras de carbono con la pasta de cemento y por lo tanto, se mejoró la resistencia a tracción, el módulo elástico y la ductilidad. Además, mediante mediciones de conductividad eléctrica, se determinó que la dispersión de la fibra en la matriz de cemento mejoró. También se comprobó que disminuían las retracciones durante el secado de la muestra. En un trabajo posterior, el mismo grupo comparó la mojabilidad de tres tipos de fibras diferentes: acero, carbono y polietileno [6]. Las conclusiones fueron que la mayor mojabilidad correspondía a las fibras de carbono, seguidas por las de acero y por último las de polietileno. Además, advirtieron de que los tratamientos de ozono beneficiaban a las fibras de carbono y a las de acero (a éstas en menor grado) y que tratamientos con acetona mejoraban la mojabilidad de las fibras de acero y etileno; aunque estas últimas mejoraban en mayor medida con tratamientos de HCl y NaOH.

Tras los exitosos ensayos con los tratamientos con ozono, el grupo de Chung siguió trabajando con funcionalización mediante grupos silano con excelentes resultados [7]. Se obtuvieron mejores resultados de tracción, módulo elástico y ductilidad que con los tratamientos realizados con ozono anteriormente.

En ocasiones, es posible combinar dos tipos de fibra diferentes y obtener un efecto sinérgico entre ellas. En un trabajo presentado en el simposio de la Materials Research Society [8], se vio como al combinar fibras de acero (25  $\mu$ m de diámetro y 3 mm de longitud) con fibras de carbono (18  $\mu$ m de diámetro y 6 mm de longitud) el resultado era superior a usar ambas fibras por separado. En este caso, las de acero ofrecían mejores resistencias, mientras que las de carbono eran más tenaces. La

combinación de ambas (manteniendo la cantidad de fibras total en volumen constante) resultó en un material compuesto con ambas ventajas integradas.

## 2.2. Nanofilamentos de carbono

La nanotecnología ha estado presente en la industria de las adiciones y aditivos de hormigón en los últimos años. Actualmente, existen productos nanométricos comerciales que se aplican en obras con relativa frecuencia. Por ejemplo, la nanosílice se adiciona a los hormigones mejorando su reología y aumentando sus propiedades mecánicas, especialmente a edades tempranas. Otras nanopartículas, como el nano-dióxido de titanio, se añade en morteros u hormigones para obtener fachadas o pavimentos autolimpiables y descontaminantes. Incluso existen productos comerciales de negro de carbón nanométrico que son usados como pigmentos para hormigones. Sin embargo, el uso de nanofilamentos de carbono (SWNTs, MWNTs y CNFs) todavía está en fase de investigación básica, con algunos grupos emergentes que están iniciando sus ensayos. Muchas de las técnicas de dispersión, funcionalización, análisis, etc., se han adaptado del campo de nanocomposites de matriz polimérica, que es más maduro y está más asentado que los nanocomposites de matriz cementícea.

En principio, teóricamente hay 3 grandes ventajas en el uso de los nanofilamentos como refuerzo en lugar de los microfilamentos. La primera de ellas es que las propiedades mecánicas de los filamentos individuales son mucho más elevadas; medidas directas realizadas a los nanotubos mediante un módulo de carga instalado en un microscopio electrónico de barrido dieron entre 11 y 63 GPa a tensión máxima de rotura y un módulo de entre 270 y 950 GPa [9], es decir, entre 3 y 20 veces más resistencia a tracción que las fibras de carbono de PAN y hasta el doble de módulo. En segundo lugar, tienen relaciones de aspecto mucho más elevadas, que hacen que se comporten mejor evitando la propagación de grietas. Y por último, son de un diámetro muy inferior, lo que hace que teóricamente puedan estar más espaciados y dispersos en la matriz, además de tener mayor área de contacto con ésta.

Uno de los primeros trabajos corresponden a Ying Li y col. [10] que observó que la resistencia a compresión se incrementaba un 19 % y la resistencia a flexión un 25% en morteros con un contenido en MWNTs del 0.5% en peso. Además, según afirman los autores, se incrementó el alargamiento máximo a rotura y se redujo la porosidad total.

En un excelente trabajo presentado por S.P. Shah en el congreso NICOM3 [11], se muestran mejoras de más de un 40 % en el módulo de Young. Este resultado se ha obtenido dispersando los nanotubos mediante una sonda de ultrasonidos y la adición de un surfactante. Los porcentajes utilizados a igualdad de refuerzo conseguido han sido de un 0.048% en peso de MWNT largos o un 0.08% en peso de nanotubos cortos. Las propiedades mecánicas se han determinado mediante nanoindentación. Estos ensayos se realizaron a nivel pasta de cemento, sin áridos.

En un trabajo presentado por ACCIONA Infraestructuras en ese mismo congreso [12], se estudió el efecto de diversos materiales sobre la propiedades mecánicas de morteros. Las nanocargas

empleadas fueron nanosílice, nanoarcillas, nanofibras y nanotubos de carbono. Los resultados obtenidos con los nanofilamentos de carbono indicaban que la presencia de la nanocarga acelera la hidratación del cemento, y por lo tanto sus resistencias mecánicas a edades tempranas (3 y 7 días). A largo plazo, se obtuvo un refuerzo del 27% a flexión con nanotubos de carbono.

Por último, hay que destacar los trabajos de J. Makar, del National Research Council of Canada [13, 14]. Los autores dispersan los nanotubos de dos modos diferenciados. Una técnica es similar a la usada por Shah [11], ya que dispersan los nanotubos en agua mediante una sonda de ultrasonidos y con la adición de un superplastificante (que hace el papel de surfactante). Y la otra técnica, con la que obtuvieron mejores resultados, consiste en dispersar los nanotubos en isopropanol con la sonda de ultrasonidos y adicionar posteriormente el cemento requerido para hacer el composite. Se mezcla todo y se continúa con el sonicado durante 4 horas. Una vez terminado el proceso se deja evaporar el isopropanol. De este modo se tiene un sólido consistente en las partículas de cemento secas íntimamente ligadas a los nanotubos. Al no haber agua, las reacciones de hidratación del cemento son inexistentes. Posteriormente se pasa al amasado convencional con agua.

Mediante este último procesado han obtenido evidencias por SEM del mecanismo de refuerzo de los nanotubos en matrices de cemento, tal y como se puede apreciar en la Figura 4. Lo sorprendente de la imagen es que la grieta tiene 500 nm de anchura y los nanotubos usados una media de 1  $\mu$ m de longitud. Este hecho evidencia que la dispersión ha sido correcta y que la interacción entre el cemento y los nanotubos de carbono es fuerte. Además, los autores comprobaron que la dureza de Vickers aumentaba a edades tempranas con la adición de nanotubos, aunque con el tiempo se igualaba a la muestra patrón.

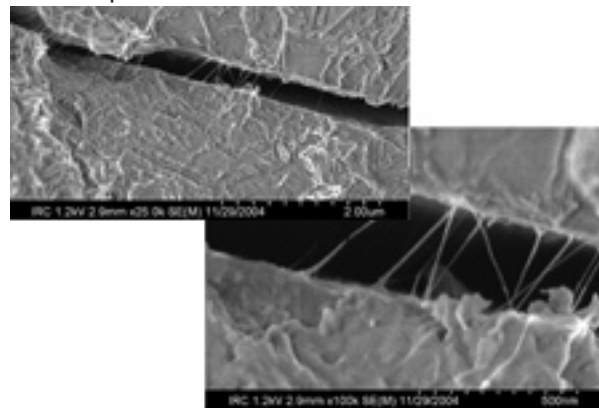


Figura 4. Nanotubos de carbono uniéndose a una grieta formada en el cemento [14].

## 3. Laminados de fibra de carbono para reforzar estructuras de hormigón

Aunque es un tema que no encaja excesivamente con la línea de este artículo, se comenta brevemente el uso de laminados de fibras de carbono como refuerzo de estructuras ya finalizadas o con defectos existentes.

Cuando un techo, muro o un pilar de hormigón están sometidos a una carga extrema y no se pueden mejorar las propiedades mecánicas de la estructura en sí misma, se puede recurrir a un refuerzo a posteriori. Es decir, sobre el muro o el pilar se puede poner un laminado de fibra de carbono con resina

epoxi para que actúe como estructura de contención, mejorando significativamente las propiedades mecánicas resultantes.

Existen cada vez más empresas que ofrecen este servicio. Se suelen usar tejidos de fibra de carbono PAN de altas prestaciones y resina epoxi para maximizar las propiedades mecánicas. Aunque el campo de aplicación es amplio, esta opción suele utilizarse en edificios de seguridad; aunque también es común su uso en la reparación de desperfectos que aparecen en las estructuras ya finalizadas debido a un mal diseño o debido a un terremoto.

#### 4. Aplicaciones multifuncionales en hormigones con filamentos de carbono

Además de las propiedades de refuerzo que ofrece el uso de los filamentos de carbono en las matrices de cemento, existen otras aplicaciones no estructurales que pueden ser interesantes en la industria de la construcción [15, 16]. Muchas de estas aplicaciones vienen dadas por la conductividad eléctrica que estos filamentos de carbono confieren a la matriz a la que se incorporan. Hay que tener en cuenta que, a diferencia de la mayoría de las matrices poliméricas, las matrices de cemento ya tienen una resistividad eléctrica de  $10^6 \Omega\text{cm}$ , por lo que es más sencillo a priori conseguir conductividades elevadas.

A continuación se describen brevemente algunas de estas aplicaciones multifuncionales:

Apantallamiento electromagnético: una cúpula de hormigón que contenga una determinada cantidad de filamentos de carbono es susceptible de actuar como una pantalla ante ondas electromagnéticas. Esto es debido a la conductividad eléctrica que los filamentos confieren al hormigón, provocando que las ondas que llegan a la estructura puedan ser reflejadas o absorbidas, pero que no pasen a su través. Evidentemente el proceso no es tan sencillo, y es necesario optimizar el porcentaje de filamentos, el espesor del hormigón, etc., para una frecuencia de ondas determinada. Debido al efecto pelicular (skin effect), los nanofilamentos de carbono son más efectivos que las fibras micrométricas para esta aplicación [15].

Protección catódica de la armadura de acero: uno de los principales problemas del hormigón armado es la corrosión de la armadura. La solución es aplicar un voltaje de modo que los electrones vayan hacia la armadura, actuando de este modo como cátodo. El problema es que el hormigón no es lo suficientemente conductor como para hacer que los electrones lleguen con facilidad a la armadura. Si se incorporan filamentos de carbono discontinuos al hormigón se podría solucionar el problema, ya que toda la estructura sería conductora y los electrones podrían fluir con más libertad hacia la armadura, protegiéndola de la corrosión.

Autosensores de carga y fallo: los materiales compuestos que constan de una matriz aislante y de unas fibras conductoras suelen exhibir una propiedad conocida como piezorresistividad. Esta propiedad consiste en el cambio en la conductividad eléctrica al aplicar una carga sobre un material. En el caso de los materiales compuestos con fibras conductoras el efecto puede explicarse mediante los fenómenos de pull-out al someter al material a tracción y pull-in al someterlo a compresión. Durante la tracción las fibras conductoras se alejan, disminuyendo de este modo la conductividad; y durante la compresión sucede el efecto contrario. Se ha comprobado en múltiples estudios que los materiales cementíceos con fibras y nanofilamentos de carbono muestran este comportamiento [15, 16]. El negro de carbón puede adicionarse con este fin sustituyendo parcialmente a los filamentos, ya que es una carga conductora más económica y reduciría el coste final [17].

Bajo este principio se pueden idear múltiples aplicaciones. Un ejemplo se muestra en la Figura 5, en la que se sensorizan tres tramos de un puente ficticio. Suponiendo que la medida de la conductividad se haga en la parte superior del puente, se muestra que al paso de un trailer (izquierda) la conductividad aumenta mucho más marcadamente que al paso de un turismo (centro). Y también se esquematiza a la derecha que un defecto en la estructura se podría detectar al producirse una caída en el valor de la conductividad medida.

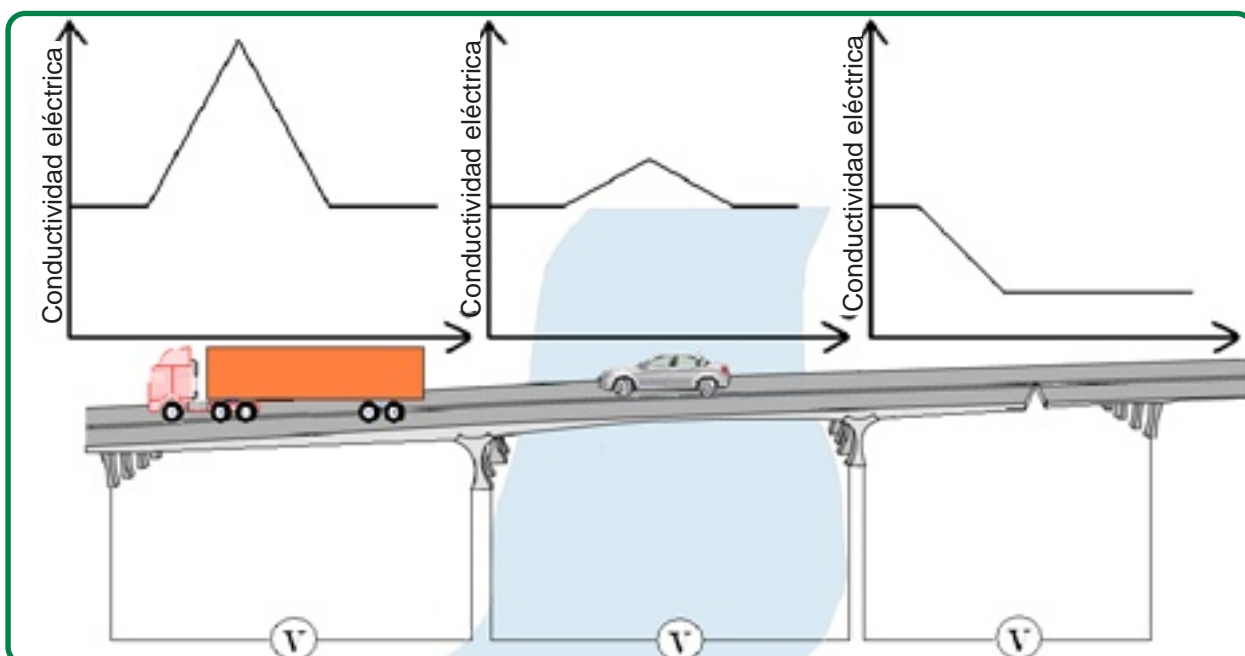


Figura 5. Puente dividido en tres tramos sensorizados independientemente; se muestra la respuesta de la conductividad (izq) al paso de un trailer, (centro) al paso de un coche y (dcha) al aparecer un defecto en la estructura.

## 5. Aplicaciones actuales

Como se ha comentado anteriormente, las aplicaciones de las fibras de carbono en hormigones se han visto muy limitadas debido a su alto coste. No obstante, ya han sido aplicadas en algunas edificaciones.

Por ejemplo, uno de los edificios más llamativos donde se usó fibra de carbono es en el Monumento a Al Shaheed en Irak, también conocido como el Memorial de los Mártires. Fue construido en 1983 en honor a los caídos en combate en la guerra contra Irán, y el elevado coste del material no supuso ningún problema para el gobierno de Saddam Hussein, dado sus enormes yacimientos petrolíferos. En la Figura 6 se puede ver un helicóptero americano (HH-60 Jayhawk) sobrevolando "amistosamente" el monumento. La estructura está compuesta de hormigón con fibra de carbono y con árido ligero, además de un pigmento verdoso. En este caso, para la selección del material se siguieron criterios de ligereza y elevada resistencia, quitando importancia a la parte económica.



Figura 6. Edificio Al Shaheed en Irak

Las fibras de carbono también se han utilizado en la fabricación de paneles para el suelo de salas de ordenadores. Los suelos de este tipo de salas suelen tener una estructura compleja que permita el paso de cables. En este caso, las fibras de carbono se usan por su conductividad eléctrica, impidiendo la acumulación de cargas electrostáticas.

En Tokio se usaron las fibras de carbono en la fachada cortina (curtain walls) del edificio de oficinas ARK de 37 plantas. Estas fachadas no soportan más cargas verticales que la suya propia y transfiere las horizontales al resto del edificio, siendo ideales para la protección contra el viento y contra los sismos. En este caso, las fibras de carbono se incorporaron debido a su ligereza y elevada resistencia mecánica.

## 6. Conclusiones

Se puede comprobar como las fibras de carbono micrométricas son un excelente refuerzo mecánico para hormigones, mejorando el comportamiento de éste a tracción y flexión. Sin embargo, el uso en la industria es muy limitado y está muy por debajo de otros filamentos micrométricos como las fibras de acero, vidrio o polipropileno, a pesar de sus prestaciones superiores. Sin duda, la limitación existente es la económica. El hormigón es un material muy económico y la adición de cualquier carga que encarezca el material hace que las mejoras obtenidas no compensen económicamente el resultado final.

Lo mismo ocurre con los nanofilamentos de carbono, con la diferencia fundamental de que todavía no se conoce hasta dónde pueden llegar los beneficios que estos materiales aportan al hormigón. Tanto en el caso de las fibras micrométricas como

en el caso de las nanométricas, se hace necesaria más investigación, enfocada a dos aspectos; por un lado a la disminución de costes; y por otro, a la mejora de los materiales compuestos para obtener las mejores prestaciones posibles.

Por último, cabe decir que las aplicaciones multifuncionales pueden ser una salida válida para este tipo de materiales en el sector de la construcción, siempre y cuando el valor añadido compense los gastos extra que estos materiales conllevan.

## 7. Principales líneas de investigación de ACCIONA Infraestructuras relacionadas con materiales carbonosos.

En el Grupo de Materiales del Departamento de I+D+i de ACCIONA Infraestructuras trabajamos en la mejora de materiales tradicionales, como el hormigón o mortero, mediante la adición de nanomateriales. Entendiendo por mejora tanto al aumento de las propiedades mecánicas de los materiales como a la incorporación de nuevas funcionalidades, como las que se han mencionado en el apartado 4 del presente artículo. Además de morteros y hormigones, también desarrollamos laminados de fibra de vidrio o de carbono con diversas resinas termoestables (epoxi, poliéster, viniléster...). Estos laminados, aunque frecuentes en el sector aeronáutico, todavía no se aplican de forma significativa en la construcción. Desde nuestro departamento queremos impulsar este tipo de materiales, mejorando sus propiedades mecánicas mediante la adición de nanofilamentos de carbono u otro tipo de nanomateriales. Estos materiales son mucho más ligeros que los convencionales de hormigón y mortero y facilitarían enormemente la puesta en obra. Además, es fundamental conferir otro tipo de propiedades a estos materiales, como las ignífugas.

Otro tema fundamental en nuestras líneas de investigación es el tema de las viviendas inteligentes y eficientes energéticamente. Paneles aislantes térmicos y acústicos, recubrimientos multifuncionales, materiales de cambio de fase, etc.

Cualquier material carbonoso que tenga cabida en cualquiera de estas aplicaciones a un coste y disponibilidad razonables es de nuestro interés.

## 8. Referencias

<sup>1</sup><http://www.20minutos.es/noticia/178953/0/hormigon/piramide/estudio>

<sup>2</sup>Ahmad, S.H., Arockiasamy, M., Balaguru, P.N., Ball, H.P., Banthia, N., Batson, G.B., Bayasi, M.Z., et al. "State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete", ACI 544.1R-96, American Concrete Institute, 2001.

<sup>3</sup> Ohama, Y.; Amano, M.; and Endo, M., "Properties of Carbon Fiber Reinforced Cement with Silica Fume", Concrete Internacional, Vol. 7, No. 3, 1985, pp. 58-62.

<sup>4</sup> Pu-Woei Chen, Xuli Fu and D.D.L. Chung, "Microstructural and Mechanical Effects of Latex Methylcellulose and Silica Fume on Carbon Fiber Reinforced Cement", ACI Mater. J. 94(2), 147-155 (1997).

<sup>5</sup> Xuli Fu, Weiming Lu and D.D.L. Chung, "Ozone Treatment of Carbon Fiber for Reinforcing Cement", Carbon 36 (9), 1337-1345 (1998).

<sup>6</sup> Weiming Lu, Xuli Fu and D.D.L. Chung, "A

Comparative Study of the Wettability of Steel, Carbon and Polyethylene Fibers by Water”, *Cem. Concr. Res.* 28(6), 783-786 (1998).

<sup>7</sup>Yunsheng Xu and D.D.L. Chung, “Carbon Fiber Reinforced Cement Improved by Using Silane-Treated Carbon Fibers”, *Cem. Concr. Res.* 29(5), 773-776 (1999).

<sup>8</sup>Banthia, N., and Sheng, J., “Micro-Reinforced Cementitious Materials,” *Materials Research Society Symposium Proceedings*, Vol. 211, Boston, Nov. 1990.

<sup>9</sup>Yu, M.-F., Lourie, O., Dyer, M.J., Moloni, K., Kelly, T.F. and Ruoff, R.S. “Strength and Breaking Mechanism of Multiwalled Carbon Nanotubes Under Tensile Load” *Science* 287, 637-640 (2000).

<sup>10</sup>Ying Li, G., Ming Wang, P., Zhao, X.: Mechanical behaviour and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes. *Carbon* 43, 1239-1245 (2005).

<sup>11</sup>Shah, S.P., Konsta-Gdoutos, M.S., Metaxa, Z.S., and Mondal, P., “Nanoscale Modification of Cementitious Materials”, *NICOM3 Proceedings*, Prague, May-June 2009.

<sup>12</sup>Vera-Agullo, J., Chozas-Ligero, V., Portillo-Rico, D., García-Casas, M.J., Gutiérrez-Martínez, A., Mieres-Royo, J.M. and Grávalos-Moreno, J., “Mortar and Concrete Reinforced with Nanomaterials”, *NICOM3 Proceedings*, May-June 2009.

<sup>13</sup>Makar, J.M., and Beaudoin, J.J., “Carbon nanotubes and their application in the construction industry”, *NICOM1 Proceedings*, Paisley, June 2003.

<sup>14</sup>Makar, J.M., Margeson, J., and Luh, J., “Carbon Nanotube/Cement Composites – Early Results and Potential Applications”, *3rd International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications*, Vancouver, Aug. 2005.

<sup>15</sup>D.D.L. Chung, “Cement Reinforced with Short Carbon Fibers: a Multifunctional Material”, *Composites: Part B* 31(6-7), 511-526 (2000).

<sup>16</sup>D.D.L. Chung, “Cement-Matrix Composites for Smart Structures”, *Smart Mater. Struct.* 9(4), 389-401 (2000).

<sup>17</sup>Wen, S., and D.D.L. Chung, “Partial Replacement of Carbon Fiber by Carbon Black in Multifunctional Cement-Matrix Composites”, *Carbon* 45(3), 505-513 (2007).