



Received: 25-02-2017

Accepted: 08-03-2017

Propiedades mecánicas de morteros de cemento con adiciones de fibras de carbono, nanotubos de carbono y grafeno.

Mechanical properties of cement mortars with additions of carbon fibres, carbon nanotubes and graphene.

María Ursúa Goicoechea

Universidad de Navarra (maria.ursua@ursua.es).

Resumen— El carbono es uno de los elementos más abundantes de la naturaleza. Su particular estructura hace que pueda tener hasta cinco tipos distintos de alótropos. Durante los últimos años se han producido grandes avances en el estudio de estos materiales de carbono. Las fibras de carbono (CF), los nanotubos de carbono (CNTs) y el grafeno y óxido de grafeno (GO), en función de su estructura y su escala, presentan unas propiedades notablemente diferenciadas. Este estudio pretende comparar y determinar los efectos de estas características en matrices de cemento. Las características de estos materiales son difíciles de transmitir de forma exacta a los compuestos de cemento y hormigones, principalmente por las dificultades que presentan los nanomateriales en su dispersión. Por ello, los datos obtenidos en distintos estudios muestran resultados muy variables. Sin embargo, se ha demostrado que, para mejoras medias, los nanomateriales resultan ser más eficientes.

Palabras clave— fibras de carbono, nanotubos de carbono, grafeno, cemento.

Abstract- Carbon is one of the most abundant elements of nature. Its particular structure has to have up to five different types of allotropes. During the last years there have been great advances in the study of these carbon materials. Carbon fibers (CF), carbon nanotubes (CNT) and graphene and graphene oxide (GO), depending on their structure and scale, have remarkably different properties. This study aims to compare and determine the effects of these characteristics on cement matrices. The characteristics of these materials are difficult to transmit accurately to concrete and cement compounds, mainly due to the difficulties presented by nanomaterials in their dispersion. Therefore, the data obtained in different studies, results, very variable. However, it has been shown that, for average improvements, nanomaterials are more efficient.

Index Terms—Carbon fibers, carbon nanotubes, graphene, cement.

I. INTRODUCCIÓN

M. U. Goicoechea es Grado en Arquitectura por la Universidad de Navarra.

El rápido progreso de la construcción hacia la sostenibilidad precisa de un gran desarrollo en los materiales para construir de forma más segura, más

duradera y más económica.

Hoy en día, el cemento Portland mantiene su popularidad como el material de construcción de elección en el campo de la ingeniería civil y la edificación. Los compuestos de hormigón son los más demandados por su excelente resistencia a compresión. Sus principales desventajas son: su baja resistencia a la formación de fisuras y su baja resistencia a tracción.

Se han realizado muchos intentos para mejorar los materiales de cemento manipulando sus propiedades con aditivos, materiales cementosos suplementarios y fibras. Entre estas adiciones, destacan los materiales de carbono, por sus singulares características.

El carbono es uno de los elementos más abundantes de la naturaleza. Puede tener hasta cinco formas alotrópicas (grafito, diamante, fullerenos, nanotubos y carbinos) con propiedades extremadamente diferentes. Esto se debe a su estructura electrónica, por la que puede formar enlaces sencillos, dobles y triples, lo que no sucede con ningún otro elemento.

Durante los últimos años se han producido grandes avances en el estudio de estos materiales de carbono. Las fibras de carbono fueron descubiertas en los años 60, pero no es hasta los años 80 cuando se introducen en la ingeniería civil y en la arquitectura (Kroto et al., 1985) (Jijima, 1980). En los años 90, con el descubrimiento de los nanotubos de carbono se abre una nueva rama relacionada con los materiales de carbono: la nanotecnología.

El grafeno se ha definido como el alótropo 2D del carbono, ya que tiene todos los átomos en un mismo plano. Para que pueda hablarse de grafeno, cada una de estas capas tiene que estar suficientemente distante de las otras para que no se produzcan reacciones entre ellas. A pesar de que se conocía desde los años 30, no es hasta 2004 cuando Novoselov y Geim consiguen aislarlo y caracterizarlo (Novoselov et al., 2004) (Borrel, Salvador, 2015).

Durante los últimos años, se han investigado de forma sistemática diferentes materiales de carbono para su uso en cementos reforzados con fibras (Brandt, 2008). Sánchez y Sobolev (Sánchez, Sobolev, 2010) y Raki (Raki et al., 2010) documentaron el estado de la nanotecnología en cemento y hormigón. Se han revisado artículos sobre nanopartículas para

determinar su papel en los compuestos de cemento (Pacheco, Torgal, 2013). Chen (Chen et al., 2011) resumió el impacto de los nanotubos de carbono en la masa de cemento, mientras Siddique y Mehta (Siddique, Mehta, 2014) estudiaron el mortero de cemento reforzado con nanotubos de carbono.

II. OBJETIVOS

Las fibras de carbono (CF), los nanotubos de carbono (CNTs) y el grafeno y óxido de grafeno (GO), en función de su estructura y su escala, presentan unas propiedades notablemente diferenciadas. Se han estudiado y descrito los cambios en las características de matrices de cemento tras la adición de estos materiales, en estudios independientes. Este estudio pretende compilar y comparar los resultados obtenidos en esos estudios para determinar la evolución de los efectos que producen dichos materiales de carbono en función de su escala y configuración molecular.

III. MATERIALES Y METODOLOGÍA

Se ha realizado un estudio exhaustivo de la literatura disponible hasta el momento relacionada con estudios individuales de cada material. Se muestran, en la Tabla 1, las diferentes características de cada uno de los materiales de estudio:

En la mayor parte de los estudios previos realizados con fibras de carbono, se han usado fibras con diámetros entre 7 y 15 μm y con longitudes medias de 5 mm. Las fibras de 5 mm de longitud se consideran fibras cortas. Estas fibras cortas pueden ser usadas como aditivos, mientras que las fibras continuas no pueden añadirse simplemente al mortero. La superficie de las fibras puede tratarse para mejorar la adhesión entre fibras y matriz y, por lo tanto, mejorar las propiedades del compuesto.

El uso efectivo de fibras de carbono en hormigón requiere la dispersión de las fibras en la mezcla. La dispersión se mejora usando humo de sílice como aditivo. El humo de sílice se usa de forma habitual con una pequeña cantidad (0.4% en peso de cemento) de metilcelulosa (Chen et al., 1997).

Sin embargo, estas consideraciones no son suficientes para conseguir la máxima efectividad de las fibras de carbono. Se

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES DE CARBONO (CHUAH ET AL., 2014)

Material	Módulo de elasticidad (GPa)	Resistencia a tracción (GPa)	Densidad (kg/m ³)	Diámetro/ espesor (nm)
Fibras de carbono	7-400	0.4-5	1770	6000-20000
CNTs	950	11-63	1330	15-40
Óxido de grafeno	23-42	0.13	1800	0.67
Grafeno	1000	130	2000	0.8

ha demostrado que el hecho de que las fibras estén dispersas aleatoriamente en los materiales cementosos reforzados fabricados por métodos tradicionales (p. ej. mediante moldes), hace que pierdan gran parte de su potencial. Esto se debe a que las fuerzas de flexión y tensión tienen, en la mayor parte de los casos, una sola dirección. Los estudios sobre pastas extruídas de cemento reforzadas con fibras han sido reportados en la literatura citada (Mu et al., 2002) (Shao, Shah, 1997) (Shen et al., 2008) (Kuder, Shah, 2010) (Qian et al., 2003) (Shao et al., 2001).

Hambach (Hambach et al., 2016) estudió el comportamiento a flexión y a compresión de compuestos de cemento reforzados con fibras alineadas.

Los materiales y procesos empleados en su estudio son:

- Tratamiento de las fibras de carbono

Las CF se obtuvieron de Toho Tenax Co., Ltd. (Tokyo, Japón). Las CF de tipo Tenax®-J HT C261 (PAN type, diámetro mínimo 7 µm) se precortaron con una longitud media de 3 mm. La resistencia a tracción de estas fibras (según los datos aportados por el fabricante) es de alrededor de 4000 MPa y su módulo de Young es de 238 GPa con una elongación hasta la rotura de 1.7%. La superficie de las FC fue oxidada en un horno NaberthermN7 / Hmuffle para mejorar la unión fibra-matriz.

- Preparación de la pasta de cemento para la probeta

Se usó un 61.5% en masa de cemento Portland tipo I 52.5 R en conjunto con un 21 % en masa de humo de sílice (Elkem Microsil), 15% en masa de agua y 2.5% en masa de un agente reductor de agua (BASF Glenium ACE 430). La relación agua-cemento es de 0.28 (incluyendo el agua del agente reductor de agua). La mezcla fresca de cemento se colocó en moldes de teflón de dimensiones 60 x 13 x 3 mm (±0.3 mm) para los ensayos de flexión y de 15 x 15 x 15 mm para los ensayos de compresión. Las muestras que contenían CFs orientadas aleatoriamente fueron colocadas al mismo tiempo en el centro de un molde de dimensiones 60 x 50 x 15 mm. Después se usó un plato vibrador para densificar. Las probetas para los ensayos se cortaron en los tamaños requeridos tras endurecer durante 7 días.

El método utilizado en este estudio para alinear las fibras se implementó mediante la inyección de la pasta de cemento (con CFs) a través de una boquilla, lo que lleva a una orientación

específica de las fibras. La mezcla de cemento se colocó en una jeringa de 20 mL (B. Braun Melsungen AG, Melsungen, Alemania) y se inyectó en moldes de teflón de dimensiones 60 x 13 x 3 mm, para los ensayos de flexión, y en moldes de dimensiones 60 x 50 x 15 mm para los ensayos a compresión. Las probetas para los ensayos a compresión se cortaron en probetas de dimensiones 15 x 15 x 15 mm 7 días después de su preparación.

- Ensayos de resistencia a flexión

Las mediciones de la resistencia a flexión se llevaron a cabo con 6 probetas para cada serie de ensayos en un dispositivo de ensayos a flexión a 3 puntos. La máquina utilizada en el ensayo fue una Zwick/Roell BT1-FR05TN.D14 con una célula de carga de 500 N. Las condiciones de ensayo fueron controladas por la deformación de 1mm por minuto.

- Ensayos de resistencia a compresión

Para las mediciones de la resistencia a compresión se ensayaron seis probetas. Se empleó una máquina Zwick/Roell BZ1-MM14640.ZW03 con una célula de carga de 50 kN.

Estudios más recientes proponen la factibilidad de usar un nuevo tipo de fibras de carbono, denominados nanotubos de carbono (CNTs). Los CNTs se clasifican en función de su geometría en nanotubos de pared simple (single-walled carbon nanotubes, SWNTs) y nanotubos de pared múltiple (multi-walled carbon nanotubes, MWNTs).

Mecánicamente, los CNTs muestran un comportamiento elástico, con un módulo de Young de 1TPa aproximadamente y una densidad de alrededor de 1.33 g/cm³. Los SWNTs tienen un límite elástico entre 20 y 60 GPa, con deformaciones elásticas de hasta el 10% (Makar et al., 2005). Así mismo, los nanotubos de carbono pueden soportar torsión y flexión sin romperse.

La dispersión de los nanotubos de carbono en la matriz es compleja dada su amplia superficie específica y debido a las fuerzas de Van der Waals, que tienden a favorecer la formación de aglomeraciones.

Tulliani (Tulliani et al., 2010) preparó muestras de hasta 10% en peso de MWNTs (>92% de pureza). Para minimizar el tamaño de las adiciones, fueron primero dispersados en agua mediante un baño ultrasónico durante cuatro horas, previas a la adición de cemento y arena. Además, un superplastificante (Mapei, Dynamon SP1) y un modificador de viscosidad

TABLA II
DISEÑO DE LAS PROBETAS

Componentes	Mortero de referencia	Mortero + MWNTs			
Superplastificante (%)	1.1	1.1	2	5	10
VMA (%)	0.5	0.5	0.5	0.5	1
MWNT (%)	0	0.5/0.75/1/1.25/1.5/1.75	2	5	10

(VMA, Mapei, Viscofluid SCC/10) fueron añadidos a la mezcla para ayudar a mejorar la cohesión y homogeneidad de la mezcla de hormigón y para evitar los problemas de segregación.

De acuerdo con el diseño de las mezclas de diferentes morteros como aparecen en la tabla 2, se prepararon probetas prismáticas de dimensiones 40 x 40 x 160 mm con 0,5% en masa de MWNTs, así como sin nanotubos de carbono, para ensayos de flexión y compresión.

Li (Li et al., 2005) utilizó MWNTs con la superficie tratada en morteros de cemento.

- Materiales

El material cementoso utilizado en los ensayos fue cemento Portland ordinario. El conglomerante utilizado fue arena estándar con una gravedad específica de 2.62. Los MWNTs empleados fueron suministrados por Shenzhen NANO-Technology Company (Limited) de China.

Los nanotubos de carbono se trataron para adherir el ácido carboxílico a su superficie. Las fibras de carbono eran isotrópicas con longitud nominal de 6 mm y diámetro de 10-14 μm , obtenidas de East-Asia Company of Shengyang, China.

- Preparación de las probetas

Se realizaron tres mezclas de mortero de cemento: pasta de cemento sin adiciones, pasta de cemento con fibras de carbono sin tratar, y pasta de cemento conteniendo nanotubos de carbono con la superficie tratada.

En las probetas de control de cemento Portland (PCC) la relación agua/cemento/arena fue 0.45/1/1.5. En las de mortero con fibras de carbono (PCCF) la relación agua/cemento/arena fue la misma con un 0.5% en peso de cemento de FCs. Para facilitar la dispersión de las fibras, se añadió un 0.4% en peso de metilcelulosa, además de un 0.13% de antiespumante. En los morteros de cemento con CNTs (PCNT) el ratio de agua/cemento/arena fue la misma que en los dos casos

anteriores, y los CNTs tratados se añadieron en un 0.5% en peso de cemento.

Las mezclas se vertieron en moldes engrasados de dimensiones 40x40x160 mm y se usó un vibrador para asegurar una buena compactación. Tras ser desmoldados se duraron en agua en una habitación a temperatura constante (30°C) y se secaron en un horno 24 horas antes de los ensayos. Se prepararon tres probetas de cada mezcla para los ensayos de flexión y compresión.

El óxido de grafeno es producido por la oxidación del grafito que puede ser fácilmente exfoliado en láminas (Hernández et al., 2011) (Wu et al., 2010). En los estudios revisados se escoge el óxido de grafeno (GO) frente al grafeno porque su obtención es más sencilla y, por lo tanto, su coste es menor. El GO tiene una elevada superficie específica, gran resistencia y flexibilidad (Potts et al., 2011) (Kuila et al., 2011) (Zhu et al., 2010).

Lv (Lv et al., 2013) estudió los efectos del óxido de grafeno en la microestructura y las propiedades mecánicas en morteros de cemento. Los materiales principales utilizados en este estudio fueron cemento ordinario Portland tipo 42.5R, arena estándar y policarboxilato como superplastificante (PC, contenido sólido 20%).

- Preparación del mortero de cemento

El mortero fue preparado mediante la mezcla de 450 g de cemento, 1350 g de arena estándar, 165 g de agua, 0.9 g de PC (dosis sólida y en relación al peso del cemento) y una cierta cantidad de GO.

Las muestras se colocaron en moldes prismáticos de tamaño 40x40x160 mm para ensayar la resistencia a flexión y a compresión. Las probetas para los ensayos de tracción se moldearon en forma de pesa con una longitud de 200 mm, cuya sección central es un rectángulo de tamaño 100x70x70 mm y ambos finales de las probetas son rectángulos de tamaño 50x70x70 mm. Tras 24 horas las probetas se desmoldaron y las probetas se curaron en una caja de curado a 20°C y al 95% de humedad relativa.

TABLA III

RESULTADOS DE TRACCIÓN (MPa) DE MORTEROS DE CEMENTO (A: CEMENTO + AGUA + AGENTE REDUCTOR DE AGUA + HUMO DE SÍLICE, A+: A + METILCELULOSA + ESPUMANTE, A+F: A+ CON FIBRAS SIN TRATAR, A+O: A+ CON FIBRAS TRATADAS CON O₃, A+K: A+ CON FIBRAS TRATADAS CON DICROMATO, A+S: A+ CON FIBRAS TRATADAS CON SILANO)

Formulación	Humo de sílice sin tratar	Humo de sílice tratado con silano
A	1.53	2.04
A+	1.66	2.25
A+F	2	2.5
A+O	2.25	2.67
A+K	2.32	2.85
A+S	2.47	3.12

TABLA IV
RESISTENCIA A FLEXIÓN EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE CURADO

Tiempo de curado	Mortero sin adiciones (MPa)	Mortero + 0,5 % MWNTs (Mpa)
1 día	2.49	3.81
7 días	6.86	7.79
28 días	7.73	10.08

IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el estudio realizado con fibras de carbono orientadas por Hambach (Hambach et al., 2016) se garantiza la correcta dispersión de las fibras y, además, su orientación óptima.

Los resultados obtenidos en este estudio son:

Resistencia a flexión mejorada al alinear las CFs en matrices de cemento

La pasta de cemento sin adiciones muestra una buena resistencia a compresión de alrededor de 101.8(\pm 19.1) MPa, pero pobre resistencia a flexión de 8.3(\pm 1.1) MPa. Añadiendo 1% en volumen de CFs dispersas aleatoriamente, la resistencia a flexión mejora de 8.3 a 20.3 (\pm 2.5) MPa (mejora relativa del 146%). Los cementos con fibras alineadas (1% en volumen) resisten esfuerzos de flexión de hasta 46.5 (\pm 4.3) MPa, lo que significa una mejora en la resistencia del 460%.

Añadiendo un 3% de CFs a la matriz de cemento y alineándolas durante la aplicación, se produce una mejora todavía mayor de su resistencia a la flexión, alcanzando valores de 119.6 (\pm 7.6) MPa, lo que se traduce en una mejora del 1340% respecto al cemento sin adiciones.

Los ensayos muestran que los valores de resistencia a la compresión disminuyen ligeramente cuando se añaden fibras a las muestras. Para un 1% de fibras dispersadas aleatoriamente obtenemos valores de 87.4 \pm 21.5) MPa y para un 1% de fibras alineadas obtenemos valores de 87.3 (\pm 11.6) MPa. Para un 3% de fibras alineadas la resistencia a compresión resultó ser 83.8 (\pm 9.0) MPa. La pérdida a resistencia a compresión al aumentar el volumen de CFs podría explicarse por los efectos negativos de introducir fibras en la matriz, lo que resulta en un compuesto con mayor porosidad que el cemento original (Li et al., 1995). Sin embargo, las muestras todavía cumplen con los más elevados estándares de cemento Portland, ya que su resistencia

es mayor que los 52.5 MPa requeridos para morteros estándar. En otros ensayos realizados con fibras cortas de carbono y recogidos por Chung (Chung, 2000), se obtuvieron valores de resistencia a tracción para diferentes composiciones de probetas. Como se muestra en la Tabla 3, la resistencia aumenta ligeramente mediante la adición de metilcelulosa y antiespumante, y mediante la adición de fibras. La efectividad de las fibras en la mejora de la resistencia aumenta en este

orden: fibras sin tratar, fibras tratadas con O3, fibras tratadas con dicromato, y fibras tratadas con silano.

Esto se aplica tanto si el humo de sílice está tratado con silano como si no lo está. Para todas las formulaciones, el humo de sílice tratado con silano da mayores resistencias que el humo sin tratar. Las mayores resistencias a tracción se obtienen mediante cemento con humo de sílice tratado con silano y fibras tratadas con silano. La resistencia es un 56% mayor que la del cemento con humo de sílice sin tratar y fibras sin tratar. La resistencia es un 26% mayor que la del mortero de cemento con humo de sílice sin tratar y con fibras tratadas con silano.

En el caso de los ensayos realizados por Tulliani (Tulliani et al., 2010) con nanotubos de carbono, los morteros mostraron sólo un incremento ligero de su resistencia a tracción, determinado mediante ensayo brasileño, para adiciones del 2% en peso de CNTs con respecto a las muestras de referencia.

Estos resultados parecen indicar que los nanotubos, a pesar de estar bien dispersos en la matriz de cemento, estaban débilmente unidas o no unidas a la misma.

En cada una de las mitades de los prismas formados se realizaron ensayos de compresión. Estos ensayos revelaron que después de 1 y 7 días de curado, las probetas que contenían MWNTs alcanzan su máxima resistencia a compresión y que, en general, la adición de nanotubos de carbono a la matriz de cemento mejora el comportamiento mecánico de las muestras en los estados iniciales de maduración.

Los resultados de los ensayos de flexión quedan reflejados en la tabla 4.

En esta tabla se ve que los morteros con adición de 0.5% en peso de CNTs tienen una resistencia de 10.08 MPa, a los 28 días de curado.

Los resultados obtenidos por Li (Li et al., 2005) en los ensayos de flexión y compresión para probetas de cemento sin adiciones (PCC), mortero con fibras de carbono sin tratar (PCCF) y morteros con nanotubos de carbono (PCNT), se muestran en la Tabla 5. Los ensayos se realizaron tras 28 días de curado. Se observa que el uso de CNTs puede mejorar tanto la resistencia a flexión como a compresión del cemento. La resistencia a compresión aumenta hasta en un 19%, mientras que la resistencia a flexión aumenta hasta el 25%. Aunque el

TABLA VII
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Material	Probetas (mm)	Adición (%)	Tracción (%)	Flexión (%)	Compresión (%)	Ref.
CF	Prismáticas 60x13x3	1-3	50-55	145-1340	-15	[48.71]
	Cúbicas 15x15x15					
CNT	Cilíndricas 40x40x160	0.25-0.5	***	30	20	[58.59]
GO	Prismáticas 40x40x160	0.01-0.05	35-78	30-60	13-48	[65]

uso de CFs puede mejorar la resistencia a flexión hasta en un 22%, la resistencia a compresión se ve disminuida.

Los morteros con adiciones de GO (contenido de oxígeno del 29.75%) contienen diferentes dosificaciones (0.01%/0.02%/0.03%/0.04%/0.05% dosificación sólida y por peso de cemento) (Lv et al., 2013). Los resultados obtenidos en los ensayos de tracción, flexión y compresión se recogen en la Tabla 6.

Los resultados indicaron que la resistencia a tracción y a flexión aumentaron al aumentar la dosificación de GO hasta el 0.03%. Para mayores dosificaciones de GO, la resistencia a tracción y flexión disminuyeron ligeramente. La resistencia a tracción y a flexión de las probetas con 0.03% de GO aumentó a los 28 días en un 78.6% y 60.7%, respectivamente, en relación a las probetas sin GO. La resistencia a compresión ha mejorado hasta una dosificación del 0.05% de GO, y la resistencia a compresión a los 28 días aumentó en un 47.9%.

Las características de estos materiales son difíciles de transmitir de forma exacta a los compuestos de cemento y hormigones, principalmente por las dificultades que presentan

los nanomateriales en su dispersión. Por ello, los datos obtenidos en distintos estudios muestran resultados muy variables (Tabla 7).

V. CONCLUSIONES

Tras analizar los resultados obtenidos en los diferentes ensayos, se demuestra que en todos los casos se produce una mejora en las características del cemento, exceptuando el caso de las fibras de carbono, que producen un cierto empeoramiento en la resistencia a compresión. Tras analizar los resultados obtenidos en los ensayos con morteros con adición de óxido de grafeno y nanotubos de carbono, se puede deducir que, para obtener resultados medios (que se pueden traducir en una mejora del 50% a tracción, 30% a flexión y 20% a compresión), los materiales de menor escala son más eficientes, puesto que son necesarias cantidades sustancialmente menores para obtener resultados similares. Sin embargo, ambos tienen mayores limitaciones que las fibras de carbono, a la hora de conseguir mayores mejoras. Esto se debe a que no se producen mejoras sustanciales a partir del 0,5% en el caso de los nanotubos de carbono y del

TABLA V
RESISTENCIAS DE DIFERENTES MEZCLAS TRAS 28 DÍAS DE CURADO

Mezcla	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia a flexión
PCC	52.27	6.69
PCCF	47.51	8.14
PCNT	62.13	8.37

TABLA VI
RESISTENCIAS A TRACCIÓN / FLEXIÓN / COMPRESIÓN

% GO	Tracción (MPa)	Flexión (MPa)	Compresión (MPa)
0	3.83	8.84	59.31
0.01	5.63	13.41	67.24
0.02	6.11	11.75	75.66
0.03	6.84	14.21	82.36
0.04	5.23	11.54	84.35
0.05	5.2	11.51	87.69

0,03% en el caso del óxido de grafeno. Con las fibras de carbono, sin embargo, se ha conseguido porcentajes de mejora de hasta un 1340% a flexión, con cantidades relativamente bajas de fibras (3% en masa). Esto va unido a un coste económico menor que el de los otros materiales, lo que explica que las fibras de carbono sean, en la actualidad, la opción más extendida.

Por lo tanto, la idoneidad de un material de carbono va a depender en gran medida del grado de mejora que se pretenda conseguir con dicha adición, siendo para grados de mejora medios-bajos más eficientes el óxido de grafeno y los nanotubos (en ese orden), y para mejoras altas, las fibras de carbono (orientadas). Además, hay que tener en cuenta que en este estudio se han valorado únicamente las propiedades mecánicas, pero estos materiales, su escala y su estructura molecular, afectan a muchos otros aspectos de los morteros de cemento.

AGRADECIMIENTOS

Especial agradecimiento a M^a Isabel Prieto, profesora de la asignatura Innovación en Estructuras del Máster en Innovación Tecnológica en Edificación de la UPM.

REFERENCIAS

- Borrel Tomás, M. A, Salvador Moya (2015). M. D. Materiales de carbono: del grafito al grafeno. Barcelona: editorial Reverté. ISBN: 978-84-291-4752-0.
- Brandt AM (2008). Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. *Compos Struct*; 86(1–3):3–9.
- Chen P, Fu X, Chung DDL (1997). *ACI Mater J*, 94(2):147–55.
- Chen SJ et al (2011). Carbon nanotube-cement composites: a retrospect. *IES J Part A: Civil Struct Eng*; 4(4):254–65.
- Chuah, S; Pan, Z; Sanjayan, J. (2014); et al. Nano reinforced cement and cement composites and new perspective from graphene oxide. *Construction and Building Mat.*, 73, 113–124.
- Chung D- (2000). Cement reinforced with short carbon fibers: A multifunctional material. *Composites Part B: Engineering*, 31 (6-7): 511-26.
- Hambach M, Möller H, Neuman T et al (2016). Portland cement paste with aligned carbon fibers exhibiting exceptionally high flexural strength (N 100 MPa). *Cement and Concrete Research*, 89, 80-86.
- Hernández Rosas JJ, Ramírez Gutiérrez RE, Escobedo-Morales A, Chigo Anota (2011). E. First principles calculations of the electronic and chemical properties of graphene, graphane, and graphene oxide. *J Mol Model*; 17:1133–9.
- Iijima, S (1980). Direct observation of the tetrahedral bonding in graphitized carbon black by high resolution microscopy. *Journal of Crystal Growth*, 50(3), 675-683.
- Katz A, Bentur A (1994). *Cem Concr Res*; 24(2): 214-20.
- Kroto, H. V; Heath, J. R; O'Brien, S. C; Curl, R. F; and Smalley (1985). R. E. C60: Buck-minsterfullerene. *Nature*, 318(6042), 162-163.
- Kuder K.G., Shah S.P. (2010). Processing of high-performance fiber-reinforced cement- based composites, *Constr. Build. Mater.* 24; 181–186.
- Kuila T, Bose S, Hong CE, Khanra P, Kim NH, Lee JH (2011). Preparation of functionalized graphene/linear low density polyethylene composites by a solution mixing method. *Carbon*; 49: 1033–7.
- Li G, Wang P, Zhao X (2005). Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes. *Carbon*; 43(6): 1239-45.
- Li V.C, Mishra D.K., Wu H.C. (1995), Matrix design for pseudo-strain-hardening fibre reinforced cementitious composites, *Mater. Struct.* 28: 586–595.
- Lv, S; Ma, Y; Qiu, C; Sun, T; Liu, J. and Zhou (2013). Q. Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites. *Construction and Building Mat.*, 49, 121-127.
- Makar J., Margeson J., Luh J.(2005). 3rd International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, Vancouver, B.C.
- Mu B., Cyr M.F., Shah S.P. (2002), Extruded fiber-reinforced composites, *Advan. Build. Techno.* 1; 239–246.
- Novoselov, K. S; Geim, A. K; Morozov, S. V; Jiang, D; Zhang, Y; Dubonos (2004). S. et al. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science*, 306, 666-669.
- Ohama Y, Amano M (1983). Proceedings of the 27th Japan Congress on Materials Research, Society of Material Science, Kyoto, Japan: 187-91.
- Ohama Y, Amano M (1985). Endo M. *Concrete Int: Design construction*, 7(3): 58-62.
- Pacheco-Torgal F et al (2013). Targeting HPC with the help of nanoparticles: an overview. *Constr Build Mater*; 38:365–70.
- Potts JR, Dreyer DR, Bielawski C, Ruoff RS (2011). Graphene-based polymer nanocomposites. *Polymer*; 52: 5–

25.

- Qian X.Q., Zhou X.M., Mu B., Z.J. Li (2003). Fiber alignment and property direction dependency of FRC extrudate, *Cem. Concr. Res.* 33, 1575–1581.
- Raki L et al (2010). Cement and concrete nanoscience and nanotechnology. *Materials*; 3(2):918–42.
- Sanchez F, Sobolev K (2010). Nanotechnology in concrete – a review. *Constr Build Mater*; 24(11):2060–71.
- Shao Y. X., Shah S.P. (1997). Mechanical properties of PVA fiber reinforced cement composites fabricated by extrusion processing, *ACI Mater. J.* 94; 555–564.
- Shao Y.X., Qiu J., Shah S.P. (2001). Microstructure of extruded cement-bonded fiberboard, *Cem. Concr. Res.* 31; 1153–1161.
- Shen B., Hubler M., Paulino G.H., L.J (2008). Struble, Functionally-graded fiber-reinforced cement composite: processing, microstructure, and properties, *Cem. Concr. Compos.* 30; 663–673.
- Siddique R, Mehta A (2014). Effect of carbon nanotubes on properties of cement mortars. *Constr Build Mater*; 50:116–29.
- Tulliani J.M, Musso S., Lecompte J.P., Ferro G. (2010). In: *Proceedings of ICRACM-2010 - 3rd International Conference on Recent Advances in Composite Materials*, Limoges (France).
- Wu YH, Yu T, Shen ZX (2010). Two-dimensional carbon nanostructures: fundamental properties, synthesis, characterization, and potential applications. *J Appl Phys*; 108(7).
- Zhu YW, Murali S, Cai WW, Li XS, Suk JW, Potts JR, et al (2010). Graphene and graphene oxide: synthesis, properties and applications. *Adv Mater*; 22:3906–24.



Reconocimiento – NoComercial (by-nc): Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.