



# Estudio de la sensibilidad a su propia deformación de escorias de alto horno activadas alcalinamente y reforzadas con fibra de carbono

## *Sensitivity study of self-sensing strain capacity of alkali-activated blast furnace slag reinforced with carbon fibres*

F. Javier Baeza de los Santos<sup>a,\*</sup>, Josep Lluís Vilaplana Abad<sup>b</sup>, Óscar Galao Malo<sup>c</sup>  
y Pedro Garcés Terradillos<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Profesor Ayudante Doctor, Universidad de Alicante, Alicante, España

<sup>b</sup> Máster e Ingeniero Civil, Doctorando, Universidad de Alicante, Alicante, España

<sup>c</sup> Dr. Ingeniero de Materiales, Profesor Asociado, Universidad de Alicante, Alicante, España

<sup>d</sup> Dr. Ciencias Químicas, Catedrático de Universidad, Universidad de Alicante, Alicante, España

Recibido el 11 de abril de 2017; aceptado el 12 de abril de 2017

Disponible en Internet el 26 de junio de 2017

### Resumen

La adición de fibras de carbono en materiales cementicios permite, además de mejorar sus prestaciones mecánicas, su utilización en otras funciones no estructurales, p. ej., sensor de deformaciones. Al incluir adiciones crecientes de fibras en pastas de escoria de alto horno activada alcalinamente se consiguió mejorar su resistencia a compresión y flexión, reducir su retracción por secado, y relacionar su resistividad con la deformación sufrida por el material en ciclos de compresión. Sin embargo, para optimizar la percepción de su deformación es necesario modificar las condiciones de saturación del material, al no funcionar correctamente estando saturado.

© 2017 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

**Palabras clave:** Fibras de carbono; Sensor; Activación alcalina; Multifuncionalidad; Retracción

### Abstract

The addition of carbon fibres is used in cement composite materials with a twofold objective: enhancement of their mechanical performance, and functionalisation of the composite, e.g. as strain sensor. Alkali-activated blast furnace slag pastes were reinforced with carbon fibres, which increased bending and compressive strengths, controlled drying shrinkage, and their resistivity could be related to strains during cyclic compression tests. However, in order to optimise this strain self-sensing property, changes in water saturation of samples are necessary, because fully saturated samples did not work properly as a strain sensor.

© 2017 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Published by Elsevier España, S.L.U. All rights reserved.

**Keywords:** Carbon fibres; Strain sensing; Alkali activation; Multifunctionality; Drying shrinkage

## 1. Introducción

El desarrollo de materiales compuestos de matriz cementicia de alta resistencia fue capaz de conseguir grandes prestaciones mecánicas sin necesidad de emplear cemento Portland [1,2]. Para tal fin, la activación alcalina surgió como alternativa de

\* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: [fj.baeza@ua.es](mailto:fj.baeza@ua.es) (F.J. Baeza de los Santos).

producción de estos materiales, empleando residuos industriales como las escorias de alto horno [3,4], reduciendo así el impacto ambiental asociado a la producción del clínker. El principal problema que presenta este tipo de compuestos es su gran retracción por secado, que habitualmente requiere del empleo de aditivos reductores de retracción para garantizar su integridad [5].

Paralelamente, el uso de fibras como adición en la fabricación también ha resultado útil como agente controlador de la retracción [1,6]. En el caso particular de emplear fibras conductoras de la electricidad en la mezcla (como son las fibras de carbono), además de mejoras en las prestaciones mecánicas del compuesto, lo transforma en un material conductor, estableciéndose así la posibilidad de realizar funciones distintas de su función estructural, por ejemplo su uso como ánodo en la extracción electroquímica de cloruros o protección catódica [7,8], su propio calentamiento (o deshielo) por calefacción por resistencia [9,10] o la percepción de deformaciones [11,12]. Dicha capacidad de ser sensibles a su propia deformación, que presentan estos materiales reforzados con adiciones conductoras de carbono (fibras, nanofibras o nanotubos de carbono), ya ha sido extensamente estudiada en matrices de cemento Portland, correlacionando los cambios en su resistencia eléctrica con su estado de deformación [12–15], incluso aplicados en vigas de hormigón armado a escala real [14].

Alternativamente, el empleo de escorias de alto horno activadas alcalinamente (EAA) como sensor de deformaciones apenas ha sido estudiado, y puede generar materiales con mayor sensibilidad a su deformación [16]. En este trabajo previo se realizaron ciclos de compresión en pastas de EAA reforzadas con fibras de carbono (FC) mientras se controlaba su resistencia eléctrica. A la vista de los resultados, se detectó la necesidad de generar cierta pérdida de humedad para poder correlacionar resistividad y deformaciones, ya que el fenómeno no era registrable en condiciones de saturación.

Por lo tanto, en el presente trabajo se ha estudiado la influencia del grado de saturación en la capacidad de percibir su propia deformación de escorias de alto horno reforzadas con fibras de carbono. Previamente, para optimizar la dosificación del material compuesto, se ha realizado un exhaustivo estudio de propiedades mecánicas (resistencias a compresión, velocidad de paso de ultrasonidos, densidad, porosidad y retracción por secado) al variar la concentración del activador o la dosificación y longitud de las fibras empleadas.

## 2. Metodología experimental

A continuación se incluye la descripción detallada de todos los materiales empleados en la fabricación de las muestras, así como las diferentes tipologías de ensayo, tanto para medir las propiedades mecánicas como la capacidad de los compuestos a registrar su propia deformación.

### 2.1. Materiales y preparación de muestras

Se fabricaron pastas de escoria activada alcalinamente (EAA) reforzadas con fibras de carbono (FC), y para ello se utilizó una escoria de alto horno que fue activada con una mezcla

Tabla 1  
Propiedades de la fibra de carbono (según fabricante)

Propiedad	Valor
Diámetro	7,2 $\mu\text{m}$
Longitud	3-6-12 mm
Contenido en carbono	95%
Resistencia a tracción	3.800 MPa
Módulo de elasticidad	242 GPa
Resistividad	$1,52 \cdot 10^{-3} \Omega \text{cm}$
Densidad	1,81 $\text{g/cm}^3$

de NaOH (en disolución acuosa de concentración variable en función de cada dosificación del material cementicio) y una disolución comercial, Waterglass (disolución acuosa con concentraciones en masa del 27% de óxido de silicio y 8% de óxido de sodio). La escoria empleada se caracterizó mediante fluorescencia de rayos X, siendo su composición química principalmente Ca (45,20%), Si<sub>2</sub> (32,32%), Al<sub>23</sub> (10,62%) y g (6,35%) [3]. Asimismo, se determinó su superficie específica mediante el método Blaine, recogido en UNE-EN 196-6:2010, obteniéndose un valor medio de  $525,7 \pm 13,1 \text{ m}^2/\text{kg}$  (para las tres muestras ensayadas).

Las muestras reforzadas con fibras incorporaron FC de tipo PAN (PANEX35) sin ningún tipo de recubrimiento, cuyas propiedades se incluyen en la tabla 1. Se emplearon tres longitudes diferentes del mismo tipo de fibra, aproximadamente 3 mm (FC3), 6 mm (FC6) y 12 mm (FC12), exactamente 1/8, 1/4 y 1/2 pulgadas. Para mejorar la dispersión de las fibras durante el amasado se empleó un tratamiento previo mediante ultrasonidos [17]. En primer lugar se mezclan manualmente las fibras en el agua de amasado, para posteriormente introducir las en el equipo de ultrasonidos (modelo Hielschier UP200S) durante 10 min a máxima potencia.

En trabajos previos empleando pastas de cemento Portland reforzadas con FC ya se cuantificó la reducción de trabajabilidad que sufren los compuestos cementicios al incluir cantidades crecientes de FC [12]. Por ello, y dada la sensibilidad del fraguado de la EAA a la concentración del activador alcalino, se plantea un estudio preliminar para determinar la dosificación de la EAA que asegura una fluidez de la muestra suficiente para garantizar el correcto amasado de las pastas que incorporan FC, sin necesidad de incorporar aditivos en la mezcla. La dosificación de una EAA viene caracterizada por tres parámetros: el módulo de la disolución (relación entre el contenido en sílice y óxido de sodio,  $s = \text{Si}_2/a_2$ ), el contenido en óxido de sodio y la relación activador/escoria.

En este primer estudio se fijó la relación activador/escoria en 0,56, variándose los otros dos parámetros, con módulos de disolución  $s = \{1,0 \ 1,2 \ 1,4\}$ , y  $\%a_2 = \{3\% \ 4\% \ 5\%\}$  con respecto a la masa de escoria.

Posteriormente se prepararon EAA con adición de FC, empleándose tres dosificaciones de FC (0,2%, 0,5% y 1% respecto de la masa de escoria) de cada una de las longitudes indicadas anteriormente, y para dos dosificaciones diferentes de disolución activadora:  $s = 1,0$  con  $5\%a_2$ ; y  $s = 1,4$  con  $4\%a_2$ , seleccionadas tras analizar los resultados del estudio preliminar en pastas sin FC. Los ensayos de percepción de deformaciones

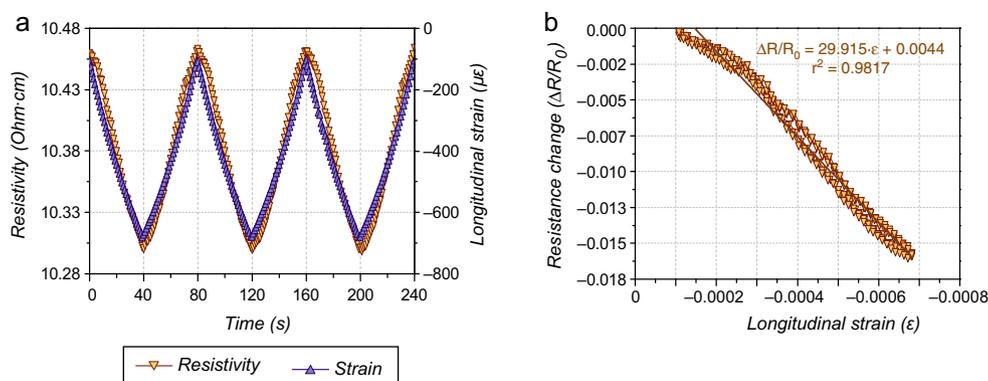


Figura 1. a) Resistividad y deformación unitaria frente al tiempo. b) Variación unitaria de resistencia frente a deformación, para una pasta de cemento con fibra de carbono. Adaptado de [17].

se realizaron únicamente con una adición de 0,5% FC6 (respecto a la masa de escoria) y un activador con  $s = 1,4$  y 4% $a_2$ .

En todos los casos el proceso de amasado constó de las siguientes fases: preparación de la disolución activadora y dispersión de las fibras si las hubiere; vertido de los materiales (escoria, disolución y fibras dispersadas) en una amasadora mecánica; amasado a velocidad lenta durante 5 min. Una vez terminado el amasado se vertió la mezcla en moldes prismáticos de  $40 \times 40 \times 160$  mm para los ensayos de resistencias mecánicas y percepción de deformaciones, y de  $25 \times 25 \times 250$  mm para la medida de retracción. Las probetas se sometieron a un proceso de compactación mecánica y se introdujeron en una cámara de ambiente controlado ( $20^\circ\text{C}$  y  $>99\%$ HR) durante 24 h, tras lo cual se desmoldaron y se volvieron a conservar en el mismo ambiente hasta la edad de ensayo, con la salvedad de una parte de las probetas de retracción, que se introdujeron en ambiente a 50%HR para su ensayo.

## 2.2. Metodologías de ensayo

### 2.2.1. Propiedades mecánicas

Previamente al vertido de la mezcla fresca en los moldes se comprobó su consistencia mediante el método de la mesa de sacudidas descrito en la norma UNE-EN 1015-3:2000. Una vez terminado el tiempo de curado establecido en cámara húmeda (7 y 28 días) se realizaron los siguientes ensayos a tres probetas ( $40 \times 40 \times 160$  mm) de cada dosificación: velocidad de paso de ultrasonidos (VPU) según UNE-EN 12504-4:2006; resistencia a flexotracción y compresión según UNE-EN 196-1:2005; densidad y porosidad de las muestras mediante balanza hidrostática según UNE-EN 1015-10:2000/A1:2007.

Paralelamente, las probetas de  $25 \times 25 \times 250$  mm se utilizaron para medida de la retracción según la norma UNE 80112:1989 EX, actualmente UNE 80112:2016. En este caso las probetas se desmoldaban después de 24 h, pasando a conservarse en un recipiente cerrado a condiciones higrotérmicas controladas,  $20^\circ\text{C}$  y 50%HR, y realizándose un control diario de la retracción por secado de las pastas. Como se detallará posteriormente, solo las pastas con adición de FC eran capaces de resistir dichas condiciones, llegando la retracción a romper todas las muestras sin refuerzo de FC. Por lo tanto, para poder hacer

una comparativa del efecto único de la FC sobre la retracción por secado se decidió duplicar el ensayo conservando las muestras en ambiente saturado ( $20^\circ\text{C}$  y 100%HR) para reducir la magnitud de los acortamientos.

### 2.2.2. Percepción de deformación

Mediante los ensayos de percepción de la deformación se pretende establecer una relación entre la deformación sufrida por el material y la variación de su resistencia eléctrica. De todas las dosificaciones caracterizadas previamente, para los ensayos de percepción de la deformación se empleó una disolución activadora con  $s = 1,4$  y 4% $a_2$ , con una adición de 0,5%FC6 (respecto a la masa de escoria). En este caso, las probetas de  $40 \times 40 \times 160$  mm se someten a ensayos de compresión cíclica, mientras se obtiene su resistencia eléctrica por el método de las cuatro puntas, fijando la intensidad de corriente a 1 mA con una fuente de corriente Keithley 6220 en los contactos externos, mientras que se registra la diferencia de potencial en los contactos internos con un multímetro digital modelo Keithley 2002. En la figura 1 se incluye un ejemplo de este tipo de ensayos (sacado de [17]) en el que se puede ver una disminución de la resistencia eléctrica de la probeta al aumentar la compresión aplicada a la muestra, siendo este cambio reversible al descargar las muestras.

Existen multitud de estudios que incluyen una descripción detallada de las variables que influyen en este fenómeno en compuestos de cemento Portland; puede encontrarse un resumen en [17]. Sin embargo, en el caso de EAA, en un trabajo previo se observó una especial influencia del grado de saturación de la muestra en la sensibilidad del material durante los ensayos de percepción [16]. En dicho trabajo, cuando las muestras se encontraban saturadas de agua no se registró una tendencia entre deformación y resistividad, que sí aparecía tras un cierto periodo de tiempo de conservación en ambiente seco. Por ello, en este trabajo se decidió fijar la carga máxima aplicada (6 kN, equivalente a una tensión de 3,75 MPa) y la velocidad de carga (200 N/s), siendo el grado de saturación el único parámetro de estudio. Para variar el contenido en humedad de las muestras se introdujeron en estufa a  $50^\circ\text{C}$ , y una vez terminados los ensayos se secaron completamente a  $110^\circ\text{C}$  para calcular el contenido total de humedad, y por tanto, los grados de saturación correspondientes.

Tabla 2  
Resultados de ensayos de flexión y compresión al usar un activador con 4%Na<sub>2</sub>O y  $M_s = 1.4$

%Na <sub>2</sub> O-Ms	Long FC	%FC	R <sub>f,7d</sub> (MPa)	R <sub>f,28d</sub> (MPa)	R <sub>c,7d</sub> (MPa)	R <sub>c,28d</sub> (MPa)
4%-1,4	3 mm	0	3,4 ± 0,4	5,7 ± 0,4	53,5 ± 1,6	61,3 ± 4,0
4%-1,4	3 mm	0,2	5,0	5,6 ± 0,7	54,0 ± 3,6	70,5 ± 2,0
4%-1,4	3 mm	0,5	10,6 ± 3,8	6,6 ± 2,2	62,9 ± 0,8	73,1 ± 4,2
4%-1,4	3 mm	1	17,6 ± 2,5	16,8 ± 1,2	60,8 ± 0,9	67,2 ± 3,1
4%-1,4	12 mm	0,2	3,5 ± 0,5	4,5 ± 0,6	47,6 ± 2,6	54,5 ± 3,2
4%-1,4	12 mm	0,5	9,2 ± 1,0	8,4 ± 0,7	52,9 ± 2,3	57,7 ± 4,9
4%-1,4	12 mm	1	11,8 ± 4,6	15,6 ± 3,4	53,8 ± 2,7	63,0 ± 3,8

Tabla 3  
Resultados de ensayos de flexión y compresión al usar un activador con 5%Na<sub>2</sub>O y  $M_s = 1$

%Na <sub>2</sub> O-Ms	Long FC	%FC	R <sub>f,7d</sub> (MPa)	R <sub>f,28d</sub> (MPa)	R <sub>c,7d</sub> (MPa)	R <sub>c,28d</sub> (MPa)
5%-1,0	3 mm	0	2,7 ± 0,6	3,6 ± 0,8	52,4 ± 2,4	65,7 ± 2,9
5%-1,0	3 mm	0,2	4,3 ± 0,5	5,9 ± 1,7	57,2 ± 2,8	63,2 ± 2,8
5%-1,0	3 mm	0,5	9,4 ± 0,9	8,9 ± 2,5	62,0 ± 2,9	65,4 ± 6,6
5%-1,0	3 mm	1	17,8 ± 4,2	18,2 ± 1,6	58,7 ± 2,7	67,2 ± 2,0
5%-1,0	12 mm	0,2	4,2 ± 0,7	4,6 ± 1,1	46,1 ± 1,7	53,6 ± 1,2
5%-1,0	12 mm	0,5	9,3 ± 1,8	9,2 ± 4,0	51,4 ± 2,7	54,1 ± 3,5
5%-1,0	12 mm	1	12,9 ± 1,6	12,4 ± 1,18	48,8 ± 1,7	57,3 ± 1,8

### 3. Caracterización mecánica

En primer lugar se analizarán los resultados más importantes de la campaña de ensayos mecánicos sobre las pastas de escoria activada alcalinamente (EAA) con adición, o no, de fibras de carbono (FC). Los resultados completos de los dos estudios realizados pueden consultarse en [3].

#### 3.1. Propiedades mecánicas

En primer lugar, se realizó el estudio de pastas de EAA sin refuerzo de FC para determinar la dosificación que posteriormente se emplearía para las EAA con adición de FC. De todas las dosificaciones preparadas no se pudieron ensayar correctamente dos de ellas. En el caso del activador con 3%*a*<sub>2</sub> y módulo *s* = 1, la mezcla no consiguió fraguar lo suficiente para ser ensayada. Mientras que en el caso opuesto, es decir, utilizando una disolución con 5%*a*<sub>2</sub> y módulo *s* = 1,4, el tiempo de fraguado se redujo de forma que solo pudo llegar a obtenerse una muestra ensayable. Se consideró innecesaria la repetición de esta última dosificación, al quedar descartada para su uso conjunto con FC debido a su pobre trabajabilidad, que se vería incluso empeorada por la adición de FC [12]. Un incremento en el contenido de *a*<sub>2</sub>, o en el módulo *s*, de la disolución activadora se reflejaba en mayores resistencias a compresión, con incrementos a 28 días del 116% entre dosificaciones diferentes. Para las pastas curadas en ambiente saturado durante 28 días la resistencia a compresión varió entre 41,28 MPa, para la disolución menos saturada, y 89,11 MPa si se empleaba una disolución con 5%*a*<sub>2</sub> y módulo *s* = 1,4. Las tendencias observadas son similares a las principales conclusiones vistas en otros estudios existentes [2,4].

El segundo estudio se centra en las pastas con adición de FC, y en este caso fijándose dos dosificaciones de activador de las ensayadas anteriormente. Las disoluciones elegidas presentaban

pastas con similar resistencia a compresión, manteniendo una trabajabilidad adecuada para poder incluir FC, pero con diferente comportamiento en su retracción por secado, como se detallará posteriormente. Las tablas 2 y 3 incluyen los valores medios y dispersiones estándar de las resistencias a flexión y compresión, para dos de las fibras empleadas, de 3 y 12 mm de longitud (los resultados completos pueden encontrarse en [3]). Lógicamente, la resistencia a flexión se vio mejorada notablemente al incluir FC en el material (al igual que en pastas de cemento Portland [12]), a 28 días de edad aumentó de 3,6 MPa hasta 18,2 MPa. Los valores obtenidos para la misma dosificación de fibras de distinta longitud fueron similares, salvo para adiciones elevadas (1% de la masa de escoria), en las que pudieron aparecer problemas de mezclado de las fibras de mayor longitud [12]. En las fibras más esbeltas es más probable la formación de aglomeraciones de fibras, con la consecuente pérdida de efectividad del refuerzo, y registrándose menores resistencias a flexión.

Observando los resultados de resistencias a compresión, fueron casi siempre mayores los valores obtenidos con el activador de menor %*a*<sub>2</sub> (4%) y mayor módulo *s*(1,4). Las variaciones de resistencia estuvieron entre aumentos hasta del 19%, para FC de 3 mm, pero con reducciones de hasta el 18% para FC de 12 mm. Este efecto de la adición de FC sobre la resistencia a compresión fue ligeramente diferente al observado en otros trabajos con cemento Portland, en los que se registraba un aumento sistemático de resistencia para cantidades crecientes de FC [12]. La diferencia de trabajabilidad, y por ende una peor dispersión de las fibras, puede ser la razón de esta diferencia de comportamiento.

#### 3.2. Retracción

La metodología de ensayo incluida en la norma UNE 80112:1989 EX fija las condiciones de conservación para la medida de la retracción por secado en 20 °C y un 50%HR. El

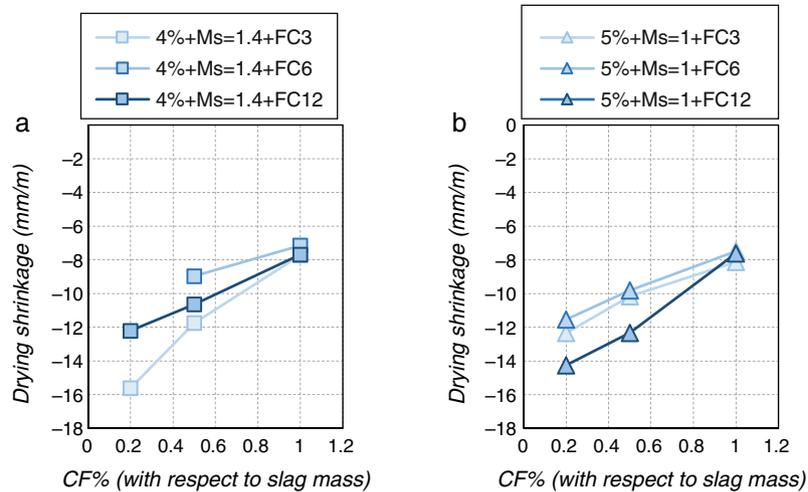


Figura 2. Retracción máxima a 20 °C y 50%HR para pastas reforzadas con FC.

principal problema de los compuestos de EAA es su retracción por secado, y al no haber empleado ningún reductor de retracción en las mezclas, las muestras sin FC mostraron una retracción muy grande, que partió todas las probetas ensayadas. Por este motivo, en la [figura 2](#) solo se incluyen los valores de la retracción máxima por secado alcanzadas en las dosificaciones con adición de FC. En este caso se puede observar fácilmente el efecto beneficioso del refuerzo con FC, reduciéndose a prácticamente la mitad la retracción de los compuestos ensayados. La tendencia para cualquier longitud de fibra ensayada es prácticamente lineal respecto a la cantidad de fibra incluida. Para un mismo porcentaje de FC no se observa la misma tendencia entre las dos dosificaciones ensayadas al variar la longitud de la fibra. Aunque si la adición es suficientemente elevada (p. ej., 1% de la masa de escoria), prácticamente todas las muestras presentan similar retracción, independientemente del tipo de fibra o disolución activadora empleados. En cualquier caso, los valores registrados están por encima de sus equivalentes empleando cemento Portland [6].

El segundo estudio de retracción realizado fijó las condiciones de conservación a 20 °C y 100%HR, con el fin de comparar muestras que no incluyesen FC con el resto de las dosificaciones que sí fueron reforzadas. En las probetas sin FC se observó que un aumento en cualquiera de los parámetros que definen el activador ( $\%a_2$  y  $s$ ) se reflejó en un aumento de la retracción, especialmente el contenido en óxido de sodio [3]. Los valores medidos, entre  $-2$  mm/m y  $-4$  mm/m son similares a los de algún estudio previo [18]. Respecto a las dosificaciones con fibras, la [figura 3](#) incluye los resultados para las series con FC3. En todos los casos las probetas con FC presentaron menor retracción que su equivalente sin FC. En estas condiciones no se observó la relación lineal entre cantidad de FC y retracción por secado del estudio anterior. De hecho, los mejores resultados se registraron para muestras con solo 0,2% FC3 (respecto de la masa de escoria), disminuyéndose la retracción a  $-1,5$  mm/m, la mitad que sin FC3. Únicamente en algunos casos con FC12 se registraron incluso aumentos en la retracción del compuesto, probablemente por los problemas de amasado y dispersión de la FC comentados anteriormente.

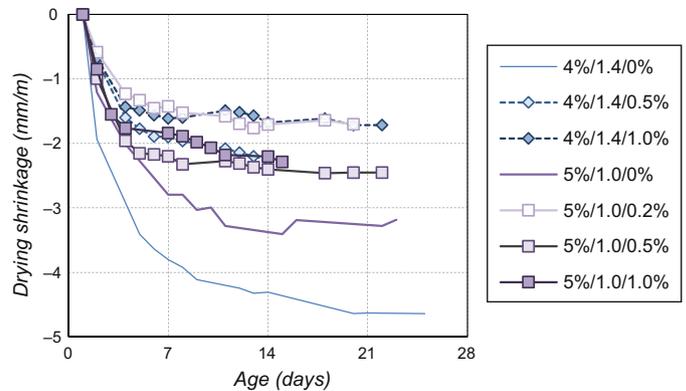


Figura 3. Evolución de la retracción por secado a 20 °C y 100%HR, en pastas reforzadas con FC3.

#### 4. Percepción de deformación

El principal objetivo del presente trabajo era profundizar en la influencia de las condiciones de humedad de las pastas de escoria activada alcalinamente (EAA) con fibras de carbono (FC) en su capacidad para percibir su propia deformación, ya estudiado en [16]. Sin embargo, se detectó una influencia de la humedad diferente a lo visto en cementos Portland; por ello, en este estudio, una vez acabado el periodo de curado, se procedió al secado progresivo de las muestras, repitiendo los ensayos de percepción para cada nivel de saturación. Para una posible aplicación real de estos sensores en estructuras sería necesario establecer un protocolo de secado y estabilización del material [19], tras el cual se impermeabilizaría la muestra fijando el grado de saturación óptimo determinado para cada dosificación. La [figura 4](#) recoge algunas de las curvas de deformación y resistividad para cada grado de saturación (GS) conseguido. A primera vista, la respuesta del material mejora al reducir el contenido de humedad (GS = 75%). A GS superiores la correlación entre deformación y resistividad es muy mala ([fig. 4b](#)). Para GS inferiores al 46%, la respuesta del material sigue siendo proporcional, pero deja de ser lineal.

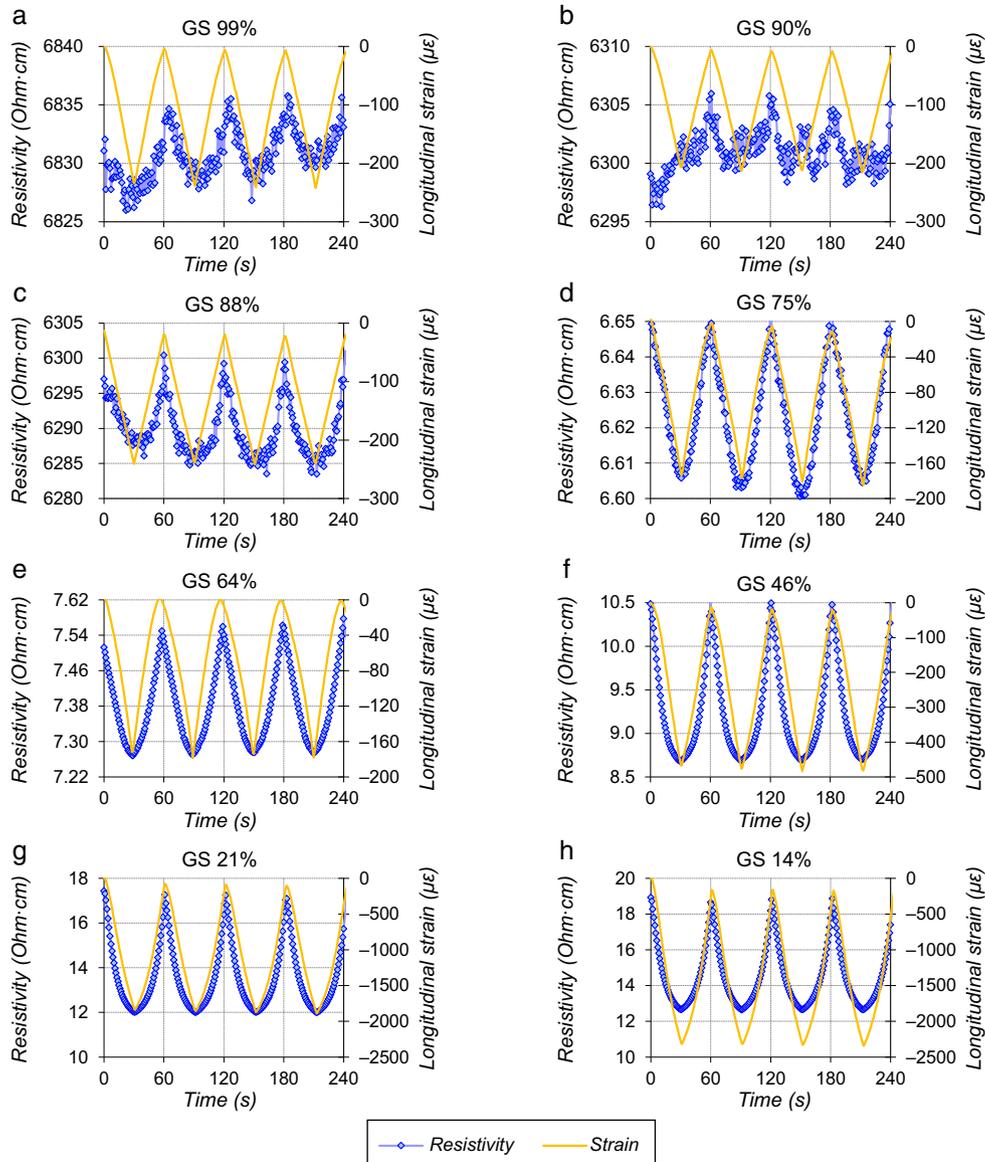


Figura 4. Resistividad y deformación unitaria para EAA con 0,5%FC6 y distintos grados de saturación (GS).

Si en vez de la evolución temporal se representan las curvas de variación unitaria de resistencia eléctrica frente a la deformación longitudinal, se pueden comparar más fácilmente los distintos GS. Para un mejor contraste, se han representado

tres escalas diferentes debido a las grandes diferencias entre series. La sensibilidad del material se caracteriza por el factor de galga, que se corresponde con la pendiente de las curvas de la figura 5. Los valores del factor de galga, junto con los

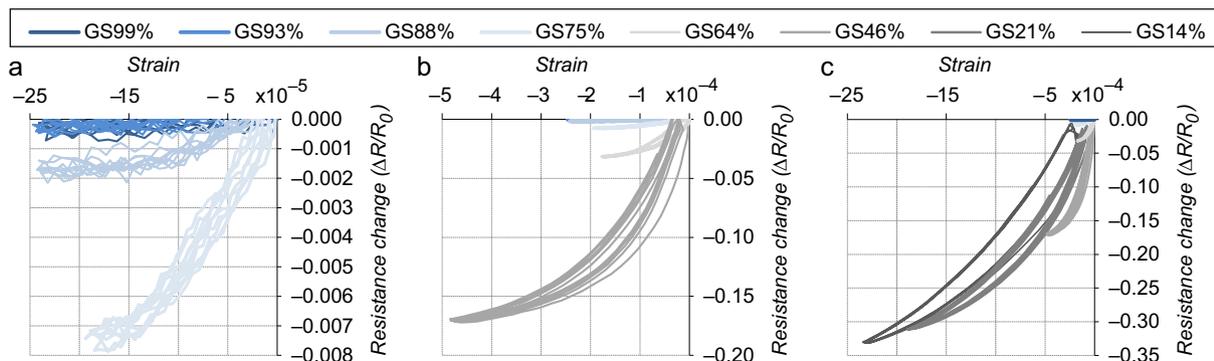


Figura 5. Curvas deformación-variación unitaria de resistencia para diferente grado de saturación.

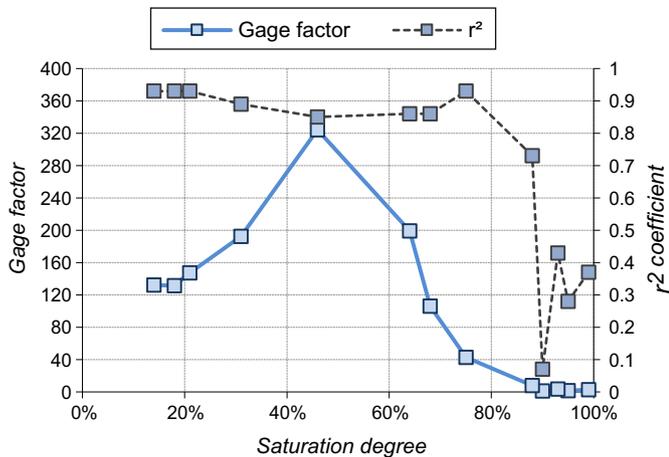


Figura 6. Factor de galga y coeficiente  $r^2$  en función del grado de saturación de pastas de escoria activada alcalinamente, y reforzada con un 0,5% (en masa de escoria) de FC de 6 mm de longitud.

coeficientes de ajuste  $r^2$ , se han representado en la figura 6. El primer cambio de comportamiento del material se registra para un GS del 75%, como se ve por el aumento grande de la pendiente en la figura 4a. Al seguir secando el material el factor de galga sigue aumentando, hasta llegar a un máximo para un GS del 46% (fig. 5b). A partir de dicha saturación óptima, un mayor secado se tradujo en una menor sensibilidad del material (fig. 6).

Por otra parte, el ciclo de carga y descarga empieza a mostrar cierta histéresis (fig. 5c), que en estudios previos (en los que se llevaron hasta rotura pastas de cemento Portland reforzadas con FC y nanofibras de carbono) se relacionó con el nivel de daño interno sufrido por el compuesto [12,13]. De hecho, todos los ensayos se realizaron a una tensión máxima constante, por lo que los aumentos del rango de las deformaciones, aproximadamente un orden de magnitud entre la figura 5a y 5c, se deben relacionar con una pérdida de rigidez del material debida a una fisuración por el proceso de secado. Por lo tanto, sería interesante valorar la posibilidad de reducir el contenido de humedad del material sin necesidad de introducirlo en estufa, a fin de evitar estos daños.

## 5. Conclusiones

Se prepararon pastas de escorias de alto horno activadas alcalinamente con adición de fibras de carbono para estudiar su posible aplicación como sensor de deformación. En primer lugar, se ha comprobado el aumento de resistencias mecánicas que se puede obtener con una adición de fibras de carbono con distintas longitudes y porcentajes. Asimismo, las fibras son capaces de controlar el nivel de retracción por secado sufrido por el material, incluso en ambiente con humedad relativa del 50% y sin necesidad de aditivos reductores de retracción. Se ha comprobado que el grado de saturación del material influye decisivamente en la sensibilidad del material a su propia de formación, siendo un grado de saturación del 46% las condiciones óptimas observadas en este estudio. En cualquier caso, es necesario corroborar que los posibles daños por efecto del secado

de las muestras no son los responsables de dichos cambios de sensibilidad.

## Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a la Comunitat Valenciana su financiación para la presente investigación, PROMETEO 2013/035. Además, se quiere reconocer la ayuda de la Ingeniería Técnica de Obras Públicas Rosa García en el desarrollo de los ensayos de caracterización en el laboratorio.

## Bibliografía

- [1] S. Bernal, R. de Gutierrez, S. Delvasto, E. Rodriguez, Performance of an alkali-activated slag concrete reinforced with steel fibers, *Constr. Build. Mater.* 24 (2010) 208–214, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.027>.
- [2] A.M. Rashad, A comprehensive overview about the influence of different additives on the properties of alkali-activated slag — A guide for Civil Engineer, *Constr. Build. Mater.* 47 (2013) 29–55, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.011>.
- [3] J.L. Vilaplana, F.J. Baeza, O. Galao, E.G. Alcocel, E. Zornoza, P. Garcés, Mechanical properties of alkali activated blast furnace slag pastes reinforced with carbon fibers, *Constr. Build. Mater.* 116 (2016) 63–71, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.066>.
- [4] F. Puertas, T. Amat, A. Fernández-Jiménez, T. Vázquez, Mechanical and durable behaviour of alkaline cement mortars reinforced with polypropylene fibres, *Cem. Concr. Res.* 33 (2003) 2031–2036, [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00222-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00222-9).
- [5] M. Palacios, F. Puertas, Effect of shrinkage-reducing admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars and pastes, *Cem. Concr. Res.* 37 (2007) 691–702, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.11.021>.
- [6] J.S. Alcaide, E.G. Alcocel, F. Puertas, R. Lapuente, P. Garcés, Carbon fibre-reinforced, alkali activated slag mortars, *Mater. Construcción.* 57 (2007) 33–48, <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/63/76>.
- [7] B. Del Moral, Ó. Galao, C. Antón, M.A. Climent, P. Garcés, Viabilidad de utilización de una pasta de cemento con nanofibras de carbono como ánodo en la extracción electroquímica de cloruros en hormigón, *Mater. Construcción.* 63 (2013) 39–48, <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2012.03111>.
- [8] J. Carmona, P. Garcés, M.A. Climent, Efficiency of a conductive cement-based anodic system for the application of cathodic protection, cathodic prevention and electrochemical chloride extraction to control corrosion in reinforced concrete structures, *Corros. Sci.* 96 (2015) 102–111, <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2015.04.012>.
- [9] O. Galao, L. Bañón, F. Baeza, J. Carmona, P. Garcés, J.F. Baeza, et al., Highly conductive carbon fiber reinforced concrete for icing prevention and curing, *Materials (Basel)*. 9 (2016) 281, <http://dx.doi.org/10.3390/ma9040281>.
- [10] O. Galao, F.J. Baeza, E. Zornoza, P. Garcés, Self-heating function of carbon nanofiber cement pastes, *Mater. Construcción.* 64 (2014) e015, <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2014.01713>.
- [11] F.J. Baeza, E. Zornoza, L.G. Andión, S. Ivorra, P. Garcés, Variables affecting strain sensing function in cementitious composites with carbon fibers, *Comput. Concr.* 8 (2011) 229–241.
- [12] F.J. Baeza, O. Galao, E. Zornoza, P. Garcés, Effect of aspect ratio on strain sensing capacity of carbon fiber reinforced cement composites, *Mater. Des.* 51 (2013) 1085–1094, <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.05.010>.
- [13] O. Galao, F.J. Baeza, E. Zornoza, P. Garcés, Strain and damage sensing properties on multifunctional cement composites with CNF admixture, *Cem. Concr. Compos.* 46 (2014) 90–98, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.11.009>.
- [14] F.J. Baeza, O. Galao, E. Zornoza, P. Garcés, Multifunctional cement composites strain and damage sensors applied on reinforced concrete (RC) structural elements, *Materials (Basel)*. 6 (2013) 841–855, <http://dx.doi.org/10.3390/ma6030841>.

- [15] C. Camacho-Ballesta, E. Zornoza, P. Garcés, Performance of cement-based sensors with CNT for strain sensing, *Adv. Cem. Res.* 28 (2016) 274–284, <http://dx.doi.org/10.1680/adcr.14.00120>.
- [16] J.L. Vilaplana, F.J. Baeza, O. Galao, E. Zornoza, P. Garcés, Self-sensing properties of alkali activated blast furnace slag (BFS) composites reinforced with carbon fibers, *Materials (Basel)*. 6 (2013) 4776–4786, <http://dx.doi.org/10.3390/ma6104776>.
- [17] F.J. Baeza, *Función de percepción de la deformación en matrices cementicias conductoras mediante adición de fibras de carbono*, Universidad de Alicante, 2011.
- [18] D. Krizan, B. Zivanovic, Effects of dosage and modulus of water glass on early hydration of alkali-slag cements, *Cem. Concr. Res.* 32 (2002) 1181–1188, [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00717-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00717-7).
- [19] C. Antón, M.A. Climent, G. de Vera, I. Sánchez, C. Andrade, An improved procedure for obtaining and maintaining well characterized partial water saturation states on concrete samples to be used for mass transport tests, *Mater. Struct.* 46 (2012) 1389–1400, <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-012-9981-4>.