

## Efecto de las nanoadiciones carbonosas en las funciones de percepción de la deformación y calefacción en pastas cementicias

B. del Moral<sup>1</sup> , C. Farcas<sup>1</sup> , O. Galao<sup>1</sup> , F. J. Baeza<sup>1</sup> , E. Zornoza<sup>1</sup> , P. Garcés<sup>1\*</sup> 

\*Autor de Contacto: [pedro.garces@ua.es](mailto:pedro.garces@ua.es)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i1.713>

Recibido: 04/11/2023 | Correcciones recibidas: 12/12/2023 | Aceptado: 19/12/2023 | Publicado: 01/01/2024

### RESUMEN

En esta investigación se ha estudiado el uso de nanoadiciones conductoras, como los nanotubos de carbono (NTC) y productos de grafito (PG), en probetas de cemento para desarrollar las funciones de percepción de la deformación y calefacción. Para ello, se han fabricado probetas de pasta de cemento con adición de 1% NTC y 5% PG y se han realizado ensayos de calefacción en corriente continua (DC) y alterna (AC) a 20 V y 40 V. Además, se ha estudiado la influencia de la temperatura en los ensayos de percepción de la deformación en rangos comprendidos entre 0 °C y 60 °C, obteniéndose buenos resultados en ambas técnicas. Por tanto, estos materiales ofrecen una alternativa muy interesante en la monitorización estructural y pueden tener aplicaciones en la calefacción de infraestructuras como puentes y aeropuertos, evitando el uso de sustancias corrosivas.

**Palabras clave:** nanoadiciones; percepción; pastas de cemento; calefacción; resistividad.

**Citar como:** del Moral, B., Farcas, C., Galao, O., Baeza, F. J., Zornoza, E., Garcés, P. (2024), “Efecto de las nanoadiciones carbonosas en las funciones de percepción de la deformación y calefacción en pastas cementicias”, Revista ALCONPAT, 14 (1), pp. 13 – 24, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i1.713>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Civil, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alicante, España.

#### Contribución de cada autor

En este trabajo Beatriz del Moral Delgado contribuyó a la actividad del desarrollo del programa experimental (35%) y procesamiento de datos (20%). Catalina Farcas contribuyó a la actividad del desarrollo del programa experimental (35%) y procesamiento de datos (20%). Oscar Galao Malo contribuyó a la% la planificación del programa experimental (25%) actividad del desarrollo del programa experimental (10%) y procesamiento de datos (15%). Francisco Javier Baeza de los Santos contribuyó a planificación del programa experimental (25%), contribuyó a la actividad del desarrollo del programa experimental (10%) y procesamiento de datos (15%). Emilio Zornoza contribuyó a la planificación del programa experimental (25%), contribuyó a la actividad del desarrollo del programa experimental (5%) y procesamiento de datos (15%). Pedro Garcés contribuyó a la planificación del programa experimental (25%), contribuyó a la actividad del desarrollo del programa experimental (5%) y procesamiento de datos (15%).

#### Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2024) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

#### Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2024 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2024.

## Effect of carbonaceous nanoadditions on strain sensing and heating functions in cement pastes

### ABSTRACT

In this research, the use of conductive nanoadditions, such as carbon nanotubes (CNT) and graphite products (GP), in cement specimens has been studied to develop strain sensing and heating functions. For this purpose, cement paste specimens with addition of 1% CNT and 5% GP have been fabricated and heating tests have been performed in direct current (DC) and alternating current (AC) at 20 V and 40 V. In addition, the influence of temperature on the strain sensing tests in the range from 0 °C to 60 °C has been studied, obtaining good results in both techniques. Therefore, these materials offer a very interesting alternative in structural monitoring and may have applications in the heating of infrastructures such as bridges and airports, avoiding the use of corrosive substances.

**Keywords:** nanoadditions; strain sensing; cement pastes; heating; resistivity.

## Efeito de nano adições de base carbono nas funções de deformação e percepção de aquecimento em pastas cimentícias

### RESUMO

Nesta pesquisa, foi estudado o uso de nano adições condutoras, como nanotubos de carbono (CNT) e produtos de grafite (PG), em corpos de prova de cimento para desenvolver as funções de detecção de deformação e aquecimento. Para tanto, foram fabricados corpos de prova de pasta de cimento com adição de 1% de CNT e 5% de PG e realizados ensaios de aquecimento em corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA) em 20 V e 40 V. Além disso, foi estudado a influência da temperatura em testes de percepção de deformação em faixas entre 0 °C e 60 °C, obtendo bons resultados em ambas as técnicas. Portanto, estes materiais oferecem uma alternativa muito interessante na monitorização estrutural e podem ter aplicações em infraestruturas de aquecimento como pontes e aeroportos, evitando a utilização de substâncias corrosivas.

**Palavras-chave:** nano adições; percepção; pastas de cimento; aquecimento; resistividade.

### Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de monitorización estructural aparecen para controlar el rendimiento de una estructura, con el fin de garantizar su seguridad y una vida útil adecuada, además de optimizar intervenciones de rehabilitación (Baeza et al., 2018). A pesar de las múltiples tipologías de sensores de deformación (sensores cerámicos piezoeléctricos, sensores de fibra óptica o galgas extensométricas), su durabilidad es limitada (Li et al., 2004; Song et al., 2006). Sin embargo, los sensores conductores de cemento han surgido como una alternativa interesante y pueden obtenerse fácilmente mediante la adición de un aditivo conductor, por ejemplo, fibras de carbono (FC), nanofibras (NFC) o nanotubos (NTC), a la matriz cementicia (Camacho-Ballesta et al., 2016; Han et al., 2015). La incorporación de estas adiciones conductoras mejora la conductividad eléctrica de la pasta cementicia, permitiendo que funcione como un sensor de deformación. Al medir los cambios en la resistividad eléctrica, el sensor puede detectar tensiones y deformaciones en la estructura. La posibilidad de correlacionar los cambios en la resistividad de los materiales con su deformación los hace, sin duda interesantes, para fines de monitorización estructural. Esta propiedad es comúnmente conocida como percepción de la deformación y ha sido ampliamente estudiada en los últimos años (Baeza et al., 2013a, 2013b; Chung, 1998; Galao et al., 2014; Ubertini et al., 2014, 2016).

La adición de un material conductor mejora la conductividad eléctrica del compuesto, convirtiéndolo en un material multifuncional que se puede aplicar a muchas otras funciones del hormigón, como el deshielo o como ánodo en técnicas electroquímicas (Carmona et al., 2015; del Moral et al., 2013). Una de las funciones más potentes y actuales que puede realizar un material cementicio conductor es la función de calefacción. El aumento de la temperatura del material se basa en el efecto Joule cuando se aplica una corriente eléctrica, en el cual el calor es generado por una corriente que fluye a través de un conductor (Ding et al., 2013; Liu et al., 2010). La capacidad de generación de calor de los materiales cementicios conductores de la electricidad está asociada con su resistencia, como lo expresa la primera ley de Joule (Wang et al., 2004). Controlando la potencia eléctrica suministrada, se puede ajustar la temperatura del compuesto. Cuando este concepto se aplica a los materiales estructurales, es posible utilizar el propio material estructural para provocar el derretimiento del hielo en su superficie (o para evitar su formación). Los sistemas de calefacción tradicionales de los edificios incluyen tuberías subterráneas, lámparas de calor infrarrojas, fluidos calentados y energía solar. Sin embargo, estos sistemas tienen una complicada construcción, un alto coste y una baja integridad con la estructura original, y por tanto su aplicación es limitada (Zhang et al., 2011). Yehia et al. (Yehia et al., 2000) y Chung (Chung, 2004) fueron pioneros en el desarrollo de esta función utilizando materiales cementicios conductores. Los compuestos en base cemento multifuncionales tienen una alta integridad estructural con las estructuras originales. Es decir, el daño inducido por la expansión térmica durante el calentamiento es insignificante, ya que su coeficiente de expansión térmica es similar al de las estructuras cementicias originales (Chung, 2004). El uso de estos materiales que pudieran ofrecer la posibilidad de aumentar su temperatura en infraestructuras de transporte como puentes o aeropuertos evitaría el uso de sales corrosivas que pudieran dañar las armaduras de acero, el propio hormigón y el ecosistema. Por lo tanto, estos materiales podrían ser viables para aumentar la temperatura ambiente de estancias o bien para prevenir la formación de hielo, o producir el deshielo, en infraestructuras de ingeniería civil, entre otras.

En esta investigación, se han llevado a cabo las funciones de percepción de la deformación y calefacción en probetas de cemento con nanoadiciones conductoras como NTC y productos de grafito.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 2.1 Fabricación de las probetas de pasta de cemento conductora

Los materiales empleados en esta investigación han sido los siguientes:

- Agua destilada.
- Cemento Portland tipo CEM I 52.5 R UNE-EN 197-1, suministrado por Cemex España S.A. (Alicante).
- Productos de grafito: Grafito expandido (ABG1010) suministrado por Superior Graphite.
- NTC Graphistrength C100 suministrados por Arkema.
- Superplastificante Sika Viscocrete 20-HE, suministrado por Sika España.

El proceso de dispersión de las nanoadiciones resulta esencial para el óptimo aprovechamiento de sus propiedades cuando se integran en el seno de la matriz cementicia. Este proceso comenzó con el pesaje de los NTC bajo campana extractora. La concentración utilizada durante este tratamiento consistió en 18 gramos de NTC por cada 450 ml de agua. A continuación, las dispersiones de NTC se prepararon utilizando un robot de aspas de la marca Robot Coupé, durante 10 minutos. La suspensión resultante se homogeniza adoptando una consistencia menos líquida y parecida a una pasta. La pasta formada por el robot se vierte de nuevo en el recipiente, recogiendo toda la pasta de las paredes del robot mediante espátula de silicona y se agrega el superplastificante Sika Viscocrete 20-HE en una proporción de  $\text{Plastificante/NTC} = 0.4$ . A continuación, se aplica un tratamiento de ultrasonidos a la dispersión, durante 10 minutos utilizando una punta de ultrasonidos modelo Hielschier UP400St con una amplitud del 65%, utilizando un baño de hielo para evitar un aumento excesivo en la temperatura de la mezcla.

El amasado de las pastas se realizó con una amasadora de morteros. Las dispersiones preparadas se vertieron totalmente en el recipiente de la amasadora y se agregó cemento en tres partes, aproximadamente 600 g cada vez. Cada parte se mezcló durante 2 minutos a velocidad baja. Finalmente, cuando se habían agregado todas las partes de cemento, la pasta se mezcló durante 1 minuto más a velocidad alta. La relación agua/cemento para estas pastas formadas con una mezcla 1% de NTC y 5% de ABG1010 fue de 0.4.

A continuación, las pastas de cemento se vertieron en moldes normalizados y se compactaron mediante una mesa vibratoria. De cada molde se elaboraron 3 probetas de  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ . Recién enrasada la pasta fresca en los moldes, se introdujeron en cámara húmeda hasta el día siguiente (24 h), cuando se extrajeron para su desmoldado y correcto etiquetado. Posteriormente, las probetas continuaron su curado en cámara húmeda (100 % HR) y a 20 °C durante 28 días, según la UNE-EN 196-1:2018. Después de 28 días de curado, se realizaron ensayos de caracterización mecánica en 3 probetas, 6 probetas se instrumentalizaron para los ensayos de conductividad y piezorresistividad y 6 probetas se preservaron para los ensayos de calefacción.

### 2.2 Descripción del ensayo de percepción en cámara climática.

Previo a los ensayos de percepción de la deformación, las probetas se instrumentalizaron para posibilitar el registro de medidas, con el método de las cuatro puntas. Esta instrumentación consiste en el pintado de cuatro bandas perimetrales con pintura de plata (Conductive Silver RS 186-3600 de RS components), sobre cuatro cables de cobre, previamente enrollados perimetralmente según el esquema de la Figura 1.

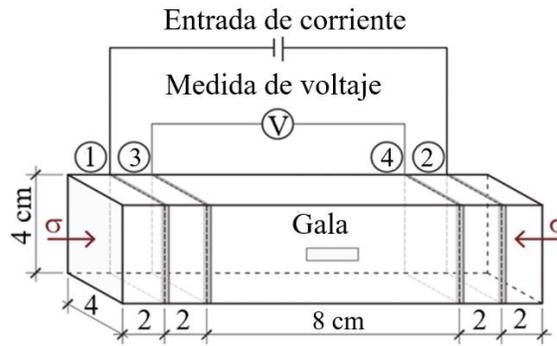


Figura 1. Esquema de la instrumentación de probetas para los ensayos de resistividad.

Los electrodos así fijados constituyen las conexiones eléctricas para la aplicación de una corriente eléctrica predefinida entre los puntos exteriores ① y ② al tiempo que se registra la diferencia de potencial medida entre los puntos interiores ③ y ④. La corriente eléctrica fue aplicada mediante una fuente digital Keithley 6220, de National Instruments Inc. La diferencia de potencial se midió con un multímetro digital Keithley 2002, de National Instruments Inc. Las galgas extensométricas de 10 mm (modelo 10/120 CLY41-4L-3M, suministrada por HBM) se utilizaron para registrar las deformaciones producidas tanto por las tensiones como por el incremento de temperatura producido durante el ensayo.

Los ensayos se realizaron en una prensa mecánica controlando la carga y la velocidad de aplicación de la misma con cámara climática modelo MUF 401, suministrada por Servosis. La temperatura del aire, dentro de esta cámara, se puede controlar con un rango de temperaturas comprendido entre  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Se representa la configuración de medida en el esquema de la Figura 2.

Además de las deformaciones relacionadas con la tensión aplicada, las muestras sufrieron deformaciones térmicas adicionales, debidas a cambios de temperatura. Para controlar este efecto, se colocó una segunda probeta (probeta de control) en la cámara climática. En esta probeta, no se aplicó carga, pero su galga fue registrando las deformaciones térmicas, que después fueron eliminadas de la medida de la probeta cargada.

La temperatura ambiente y la temperatura de la superficie de ambas probetas se midieron con sensores de temperatura tipo Pt-100. Además, en la probeta de control se realizó un pequeño taladro para instalar un termopar en su centro y poder controlar posibles gradientes térmicos. Para limitar el efecto de la pérdida de agua relacionada con el calentamiento de la probeta, las temperaturas se fijaron entre  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  (con incrementos de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

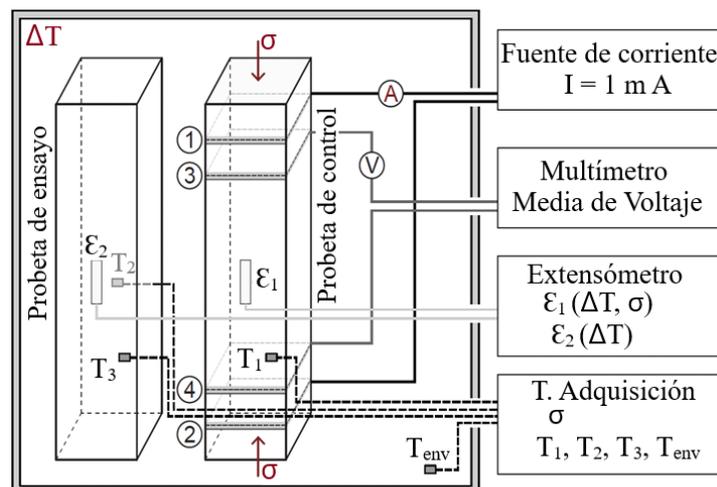


Figura 2. Esquema del ensayo dentro de la cámara climática (del Moral et al, 2021).

### 2.3 Descripción del ensayo de calefacción.

Los ensayos de calefacción se realizaron en condiciones de laboratorio, después del período de curado. Los ensayos consistieron en aplicar diferentes voltajes en corriente alterna y corriente continua entre los dos extremos de las probetas conductoras ( $4 \times 4 \text{ cm}^2$ ). Previamente se aplicó una capa de pintura conductora de plata para mejorar el contacto eléctrico entre los electrodos primarios (placa de cobre de 0.5 mm de espesor y fieltro de carbono de 2 mm de espesor) y el material cementicio. El montaje se puede observar en la Figura 3.

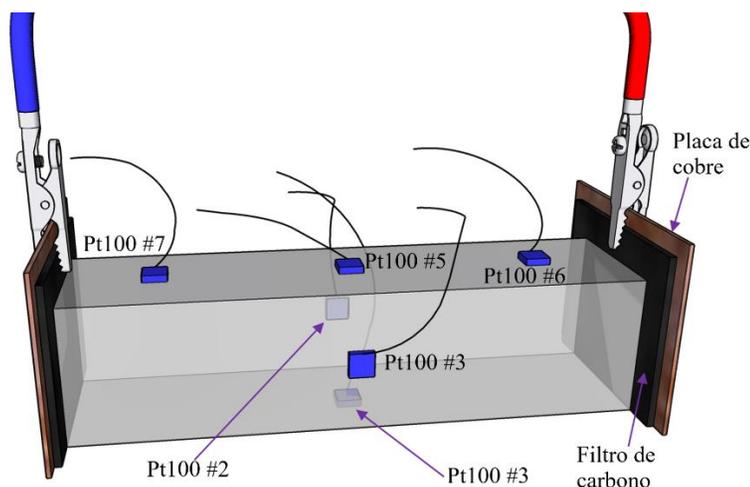


Figura 3. Esquema de una probeta de  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  preparada para ser ensayada.

Los cambios de temperatura en la superficie de las muestras se registraron continuamente mediante 6 detectores de temperatura de resistencia tipo Pt-100 conectados a un registrador de datos y otros dos sensores Pt-100 se colocaron para controlar la temperatura ambiente.

Las pruebas de calefacción se realizaron aplicando distintos voltajes. Cuanto mayor fue la tensión aplicada, más alta fue la temperatura registrada. Se aplicaron diferentes voltajes con una fuente de alimentación continua (DC) y una fuente de alimentación alterna F5V (AC, a 50 Hz). En ambos casos, la corriente eléctrica se midió con multímetros digitales Keithley2002.

## 3. RESULTADOS

### 3.1 Resultados en los ensayos de percepción a diferentes temperaturas.

Se estudió la influencia de la temperatura entre  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  en ensayos aislados. La Tabla 1 resume los parámetros relevantes de los ensayos realizados en días diferentes para  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ . Las probetas regresaban a temperatura ambiente de forma natural y al día siguiente se procedía a realizar la temperatura siguiente.

Tabla 1. Efecto de la temperatura sobre diferentes parámetros electromecánicos durante los ensayos de percepción de la deformación: resistividad eléctrica, módulo elástico, factor de galga y coeficiente  $R^2$  de Pearson de la regresión lineal.

Temperatura	Resistividad eléctrica (ohm·cm)	Módulo Elástico (GPa)	Factor de Galga (FG)	$R^2$
$0 \text{ }^\circ\text{C}$	43.70	26.20	14.30	0.968
$20 \text{ }^\circ\text{C}$	43.80	26.00	17.40	0.971
$40 \text{ }^\circ\text{C}$	44.18	23.60	22.30	0.975
$60 \text{ }^\circ\text{C}$	45.70	23.10	58.80	0.888

Hubo un ligero aumento de resistividad con la temperatura, de 43.7 Ohm·cm a 0 °C a 45.7 Ohm·cm a 60 °C. En otro trabajo, tampoco se reportaron cambios significativos en la conductividad en el intervalo comprendido entre 50 y 115 °C (Demircilioğlu et al., 2019).

Por otro lado, la respuesta mecánica fue similar en todos los ensayos, con módulos elásticos entre 23 y 26 GPa (descartando cualquier daño estructural durante los procesos de carga o calentamiento) (del Moral et al., 2021). Sin embargo, hubo cambios severos en la respuesta piezorresistiva (véase Figura 4) y el factor de galga (FG) a 60 °C fue cuatro veces el FG a 0 °C. Se observó una clara tendencia creciente en el FG al calentar, especialmente en el último nivel de temperatura. No se tomó ninguna medida específica para evitar el intercambio de humedad entre las muestras y el medio ambiente. En la Figura 4 se muestran gráficamente los factores de galga en las diferentes temperaturas ensayadas.

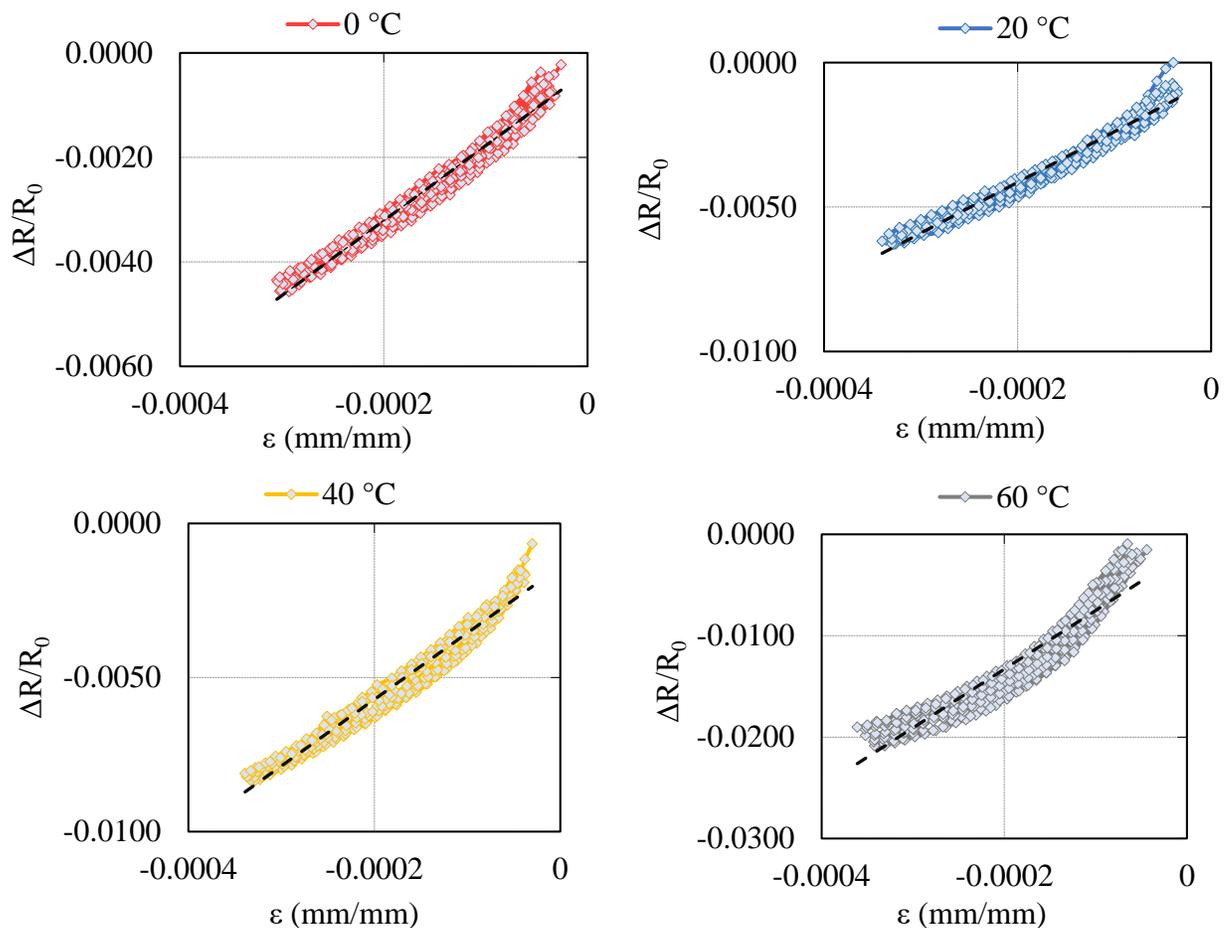


Figura 4. Respuesta piezorresistiva de la pasta de 1% NTC y 5% ABG1010 a diferentes temperaturas: 0 °C, 20 °C, 40 °C y 60 °C. Se representan los cambios de resistencia eléctrica frente a su deformación para obtener el factor de galga.

En investigaciones anteriores (Gomis et al., 2015), Gomis determinó que en 60 °C había un punto de inflexión en estos cambios de humedad, y durante los ensayos de calefacción se observó que el agua de los poros, en los materiales cementicios, podría sufrir un cambio de estado y comenzar a evaporarse. Esta modificación de la solución de los poros puede haber afectado el equilibrio entre las conducciones electrolíticas y electrónicas, mejorando el rendimiento de la percepción de la deformación en los ensayos después de un pequeño secado (Allam et al., 2020; Chung, 2004; Vilaplana et al., 2013).

Además, según Shifeng (Shifeng et al., 2007), la temperatura puede aumentar el efecto túnel en el rango por debajo de los 100 °C, porque los electrones transforman la energía térmica en energía cinética. Más allá del límite de 100-130 °C, se obtienen valores de resistividad más altos, por la presión de poro interna debido al aumento del vapor de agua.

En nuestro caso, las probetas se calentaron a una temperatura máxima de 60 °C, con el consiguiente secado superficial. Por lo tanto, la movilidad del electrón se incrementó debido a una mejor conducción electrónica y por el efecto túnel, que puede haber resultado en una respuesta piezorresistiva mejorada a dichas temperaturas.

### 3.2 . Resultados en los ensayos de calefacción.

La Figura 5 muestra los resultados obtenidos para la pasta de cemento con 1% NTC y 5% ABG1010 aplicándole una tensión de 20 V AC y DC. Se muestran los valores promedio de temperatura de la muestra para ambos ensayos en °C y la corriente monitorizada (líneas discontinuas) en amperios (A). En estos ensayos se ha conseguido un incremento de temperatura de +17 °C para ambos tipos de corriente, lo que podría ser una variación suficiente para la aplicación de sistemas de deshielo con temperatura ambiente superior a -15 °C.

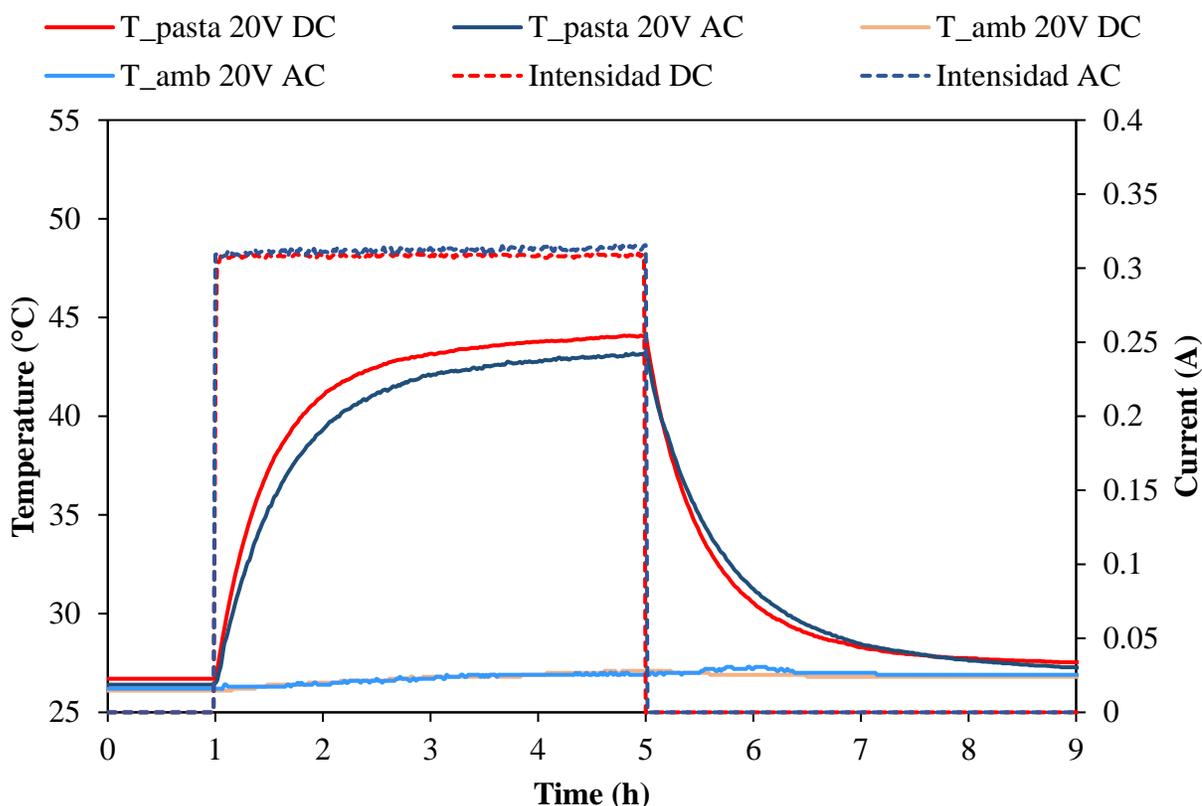


Figura 5. Temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), temperatura media de la muestra ( $T_{pasta}$ ), ambas en °C, y la corriente monitoreada (líneas discontinuas), en A, en función del tiempo (en horas), para ensayos de calefacción de pasta de cemento en AC y DC con un voltaje fijo de 20 V.

La Figura 6 muestra la temperatura de seis ensayos de calefacción con tres muestras diferentes de amasadas diferentes con el mismo voltaje (40 V) en DC y AC. Como se puede observar, los resultados son muy similares, lo que confirma la reproducibilidad (mismo comportamiento de diferentes muestras a la misma prueba).

Como se puede observar, duplicar la tensión aplicada implica duplicar la corriente eléctrica, lo que

implica una resistividad constante de los compuestos en el rango de temperatura mostrado (Farcas et al., 2021). Por otro lado, la temperatura máxima alcanzada a 40 V (AC y DC) es aproximadamente 3.3 veces mayor que la temperatura máxima alcanzada a 20 V (AC y DC).

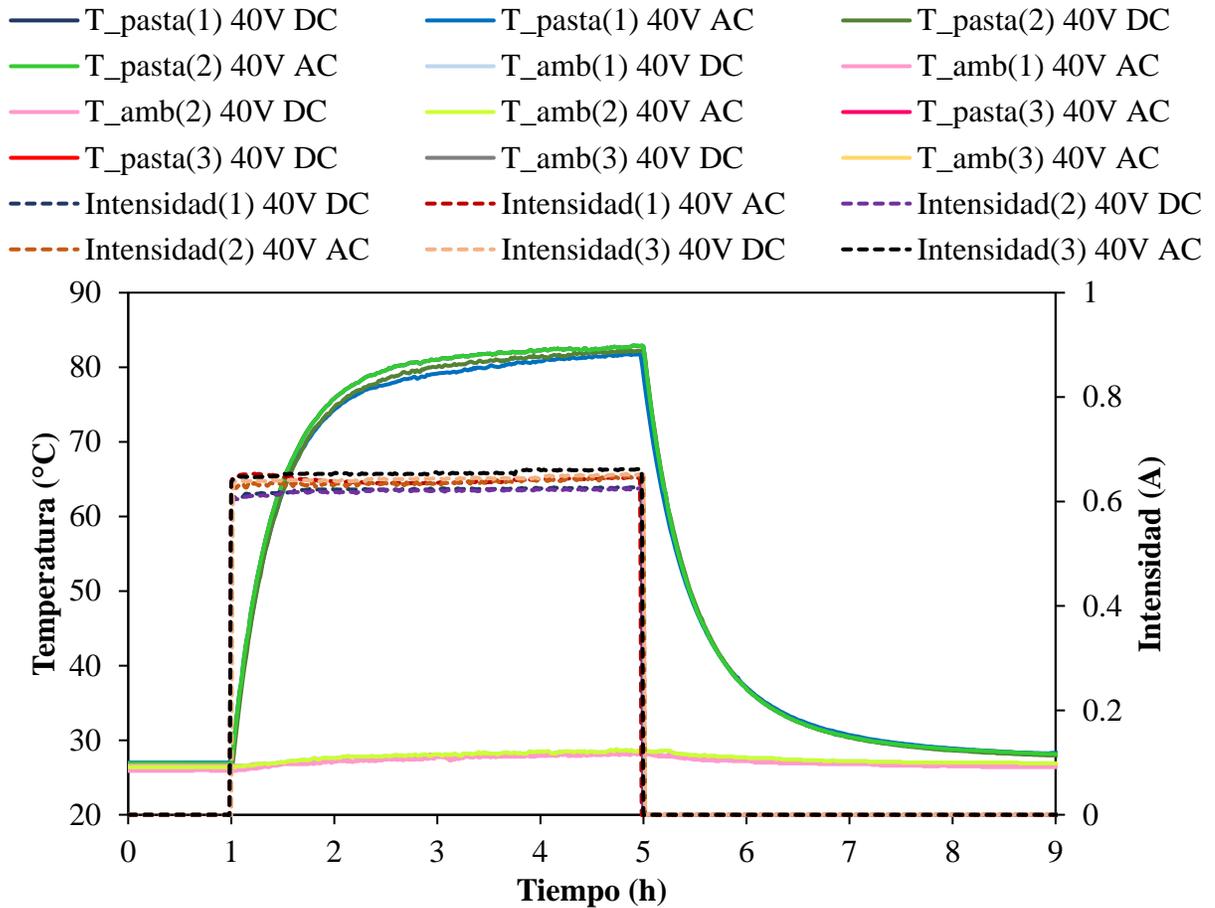


Figura 6. Temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), temperatura media de la muestra ( $T_{pasta}$ ), ambas en  $^{\circ}\text{C}$ , y la corriente (líneas discontinuas), en A, en función del tiempo (en horas), para pruebas de calefacción de pasta de cemento en AC y DC con un voltaje fijo de 40 V.

Tabla 2. Resumen de las características eléctricas (resistividad, tipo de corriente y tensión aplicada), variación de temperatura y potencia media

Resistividad (ohm·cm)	AC/DC	Voltaje (V)	Intensidad (A)	$\Delta T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Potencia media ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
67	DC	20	0.33	17.10	304
64	AC	20	0.31	17.00	310
64	DC	40	0.64	53.60	1267
67	DC	40	0.62	53.20	1228
67	DC	40	0.62	54.30	1224
66	AC	40	0.63	54.40	1230
64	AC	40	0.64	54.80	1273
63	AC	40	0.65	55.70	1294

La

Tabla 2 resume las características eléctricas (resistividad, tipo de corriente y voltaje fijo aplicado), variación de temperatura y la característica energética, la potencia media, de las pruebas de calefacción. En todos los casos, se pueden obtener incrementos de alta temperatura con voltaje y corriente eléctrica relativamente pequeños. De hecho, el tipo de corriente aplicado parece no jugar un papel importante en el comportamiento térmico y el rendimiento energético de este material. La resistividad de las muestras permanece estable en todas las condiciones.

#### 4. CONCLUSIONES

- Se ha comprobado la viabilidad del uso de sensores de pasta de cemento en la función de percepción de la deformación a diferentes temperaturas.
- Se comprueba un ligero aumento de resistividad con la temperatura en los ensayos de percepción de la deformación. Además, el aumento de temperatura (entre 0 y 60 °C) condujo a valores del FG más altos.
- Se ha comprobado la viabilidad de la función de calefacción en pastas de cemento conductoras de la electricidad gracias a la adición de 1% NTC + 5% ABG1010, mediante la aplicación tanto de corriente continua (DC) como de corriente alterna (AC), con diferencias insignificantes en el comportamiento de ambas corrientes.
- Los resultados han demostrado que las muestras de pasta de cemento aplicándoles un voltaje de 20 V pudieron aumentar su temperatura con +17 °C. Por lo tanto, estos compuestos serían factibles para aplicaciones de prevención y deshielo en sitios con una temperatura ambiental de -15 °C.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido posible gracias a la financiación recibida de los fondos europeos del proyecto Grant Agreement 760940 MASTRO.

#### 6. REFERENCIAS

- Allam, H., Duplan, F., Clerc, J. P., Amziane, S., Burtschell, Y. (2020). *About electrical resistivity variation during drying and improvement of the sensing behavior of carbon fiber-reinforced smart concrete*. In *Construction and Building Materials* (Vol. 264). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120699>
- Baeza, F. J., Galao, O., Zornoza, E., Garcés, P. (2013a). *Effect of aspect ratio on strain sensing capacity of carbon fiber reinforced cement composites*. *Materials and Design*, 51, 1085–1094. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.05.010>
- Baeza, F. J., Galao, O., Zornoza, E., Garcés, P. (2013b). *Multifunctional cement composites strain and damage sensors applied on reinforced concrete (RC) structural elements*. *Materials*, 6(3), 841–855. <https://doi.org/10.3390/ma6030841>
- Baeza, F. J., Ivorra, S., Bru, D., Varona, F. B. (2018). *Structural health monitoring systems for smart heritage and infrastructures in Spain*. *Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering*, 92, 271–294. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-68646-2\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-68646-2_12)
- Banthia, F. A. and N. (n.d.). *Carbon Fiber-Reinforced Cementitious Composites for Tensile Strain Sensing*. *ACI Materials Journal*, 114(1). <https://doi.org/10.14359/51689486>
- Camacho-Ballesta, C., Zornoza, E., Garcés, P. (2016). *Performance of cement-based sensors with CNT for strain sensing*. *Advances in Cement Research*, 28(4), 274–284.

<https://doi.org/10.1680/adcr.14.00120>

- Carmona, J., Climent, M.-Á., Antón, C., De Vera, G., Garcés, P. (2015). *Shape Effect of Electrochemical Chloride Extraction in Structural Reinforced Concrete Elements Using a New Cement-Based Anodic System*. In *Materials* (Vol. 8, Issue 6). <https://doi.org/10.3390/ma8062901>
- Chung, D. D. L. (1998). *Self-monitoring structural materials*. 22.
- Chung, D. D. L. (2004). *Self-heating structural materials*. In *Smart Materials and Structures* (Vol. 13, Issue 3, pp. 562–565). <https://doi.org/10.1088/0964-1726/13/3/015>.
- del Moral, B., Galao, Ó., Antón, C., Climent, M. A., Garcés, P. (2013). *Viabilidad de utilización de una pasta de cemento con nanofibras de carbono como ánodo en la extracción electroquímica de cloruros en hormigón*. *Materiales de Construcción*, 63(309), 39–48. <https://doi.org/10.3989/mc.2012.03111>.
- del Moral, B., Baeza, F.J., Navarro, R., Galao, O., Zornoza, E., Vera, J., Farcas, C., Garcés, P. *Temperature and humidity influence on the strain sensing performance of hybrid carbon nanotubes and graphite cement composites*. *Construction and Building Materials* 284 (2021) 122786. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122786>.
- Demircilioğlu, E., Teomete, E., Schlangen, E., Baeza, F. J. (2019). *Temperature and moisture effects on electrical resistance and strain sensitivity of smart concrete*. In *Construction and Building Materials* (Vol. 224, pp. 420–427). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.091>.
- Ding, Y., Chen, Z., Han, Z., Zhang, Y., Pacheco-Torgal, F. (2013). *Nano-carbon black and carbon fiber as conductive materials for the diagnosing of the damage of concrete beam*. *Construction and Building Materials*, 43, 233–241. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.010>.
- Farcas, C., Galao, O., Navarro, R., Zornoza, E., Baeza, F. J., Del Moral, B., Pla, R., Garcés, P. (2021). *Heating and de-icing function in conductive concrete and cement paste with the hybrid addition of carbon nanotubes and graphite products*. *Smart Materials and Structures*, 30(4). <https://doi.org/10.1088/1361-665X/abe032>.
- Galao, O., Baeza, F. J., Zornoza, E., Garcés, P. (2014). *Strain and damage sensing properties on multifunctional cement composites with CNF admixture*. *Cement and Concrete Composites*, 46, 90–98. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.11.009>.
- Gomis, J., Galao, O., Gomis, V., Zornoza, E., Garcés, P. (2015). *Self-heating and deicing conductive cement. Experimental study and modeling*. *Construction and Building Materials*, 75, 442–449. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.042>.
- Han, B., Ding, S., Yu, X. (2015). *Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review*. *Measurement*, 59, 110–128. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.048>.
- Li, H. N., Li, D. S., Song, G. B. (2004). *Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering*. *Engineering Structures*, 26(11), 1647–1657. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.05.018>.
- Liu, Q., Schlangen, E., García, Á., van de Ven, M. (2010). *Induction heating of electrically conductive porous asphalt concrete*. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1207–1213. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.019>.
- Materials, C., Publishers, K. A. (2001). *Functional properties of cement-matrix*. 6, 1315–1324.
- Shifeng, H., Dongyu, X., Jun, C., Ronghua, X., Lingchao, L., Xin, C. (2007). *Smart properties of carbon fiber reinforced cement-based composites*. *Journal of Composite Materials*, 41(1), 125–131. <https://doi.org/10.1177/0021998306063378>.
- Song, G., Mo, Y. L., Otero, K., Gu, H. (2006). *Health monitoring and rehabilitation of a concrete structure using intelligent materials*. *Smart Materials and Structures*, 15(2), 309–314. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/15/2/010>.

- Ubertini, F., Laflamme, S., Ceylan, H., Luigi Materazzi, A., Cerni, G., Saleem, H., D'Alessandro, A., Corradini, A. (2014). *Novel nanocomposite technologies for dynamic monitoring of structures: a comparison between cement-based embeddable and soft elastomeric surface sensors*. Smart Materials and Structures, 23(4), 45023. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/4/045023>.
- Ubertini, F., Laflamme, S., D'Alessandro, A. (2016). *Smart cement paste with carbon nanotubes*. In Innovative Developments of Advanced Multifunctional Nanocomposites in Civil and Structural Engineering (pp. 97–120). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-326-3.00006-3>.
- Vilaplana, J. L., Baeza, F. J., Galao, O., Zornoza, E., Garcés, P. (2013). *Self-sensing properties of alkali activated blast furnace slag (BFS) composites reinforced with carbon fibers*. Materials, 6(10), 4776–4786. <https://doi.org/10.3390/ma6104776>.
- Wang, S., Wen, S., Chung, D. (2004). *Resistance Heating Using Electrically Conductive Cements*. Advances in Cement Research - ADV CEM RES, 16, 161–166. <https://doi.org/10.1680/adcr.16.4.161.46662>.
- Yehia, S., Tuan, C. Y., Ferdon, D., Chen, B. (2000). *Conductive concrete overlay for bridge deck deicing: Mixture proportioning, optimization, and properties*. ACI Structural Journal, 97(2), 172–181. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0034161181&partnerID=40&md5=2b2d7c46c87b0e36654bccde13f559a3>.
- Zhang, K., Han, B., Yu, X. (2011). *Nickel particle based electrical resistance heating cementitious composites*. Cold Regions Science and Technology, 69(1), 64–69. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.07.002>