

Hormigones conductores multifuncionales: avances, aplicaciones y desafíos para una infraestructura inteligente.

P. Garcés Terradillos^{1*} , O. Galao¹ , F. Ubertini² 

*Autor de Contacto: pedro.garces@ua.es

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i1.876>

Recibido: 15/07/2025 | Correcciones recibidas: 24/11/2025 | Aceptado: 08/12/2025 | Publicado: 01/01/2026

RESUMEN

Este artículo plantea el fundamento y evolución en la investigación desarrollada de las principales funciones desarrolladas con materiales cementicios conductores. Los hormigones conductores multifuncionales representan una innovación en el campo de los materiales cementicios, con capacidades no solo estructurales, sino también eléctricas, térmicas y como sensor. Las funciones planteadas son: a) Función de percepción de la deformación y del daño estructural de una estructura al estar sometida esfuerzos, sin llevar algún sensor adherido o embebido en él mismo. b) Función de calefacción y deshielo por efecto Joule para aplicaciones como deshielo o calefacción en edificaciones. c) Función de apantallamiento de campos electromagnéticos (EMI) de la propia estructura conductora.

Palabras clave: hormigón conductor, multifuncionalidad, piezorresistividad, calefacción y deshielo, apantallamiento.

Citar como: Garcés Terradillos1, P., Galao, O., Ubertini, F. (2026), “*Hormigones conductores multifuncionales: avances, aplicaciones y desafíos para una infraestructura inteligente.*”, Revista ALCONPAT, 16 (1), pp. 23 – 41, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i1.876>

¹ Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Alicante, España.

² Departamento de Ingeniería Civil y ambiental de la Universidad de Perugia, Italia.

Contribución de cada autor

En este trabajo el autor Garcés contribuyó con la idea original, la recolección de datos, la escritura del trabajo, la discusión y conclusiones del trabajo, al 50%, y los autores Galao y Ubertini, en las mismas actividades, al 25%, respectivamente.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2026) 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 2026 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2026.

Multifunctional conductive concretes: advances, applications, and challenges for smart infrastructure.

ABSTRACT

This article presents the foundations and evolution of research into the main functionalities developed using conductive cementitious materials. Multifunctional conductive concrete represents an innovation in the field of cement-based materials, exhibiting not only structural capabilities but also electrical, thermal, and sensing functions. The addressed functions are: a) strain and structural damage sensing in a load bearing structure without the need for any attached or embedded sensor; b) heating and de-icing function through the Joule effect, for applications such as surface de-icing or building heating; and c) electromagnetic interference (EMI) shielding provided by the conductive structure itself.

Keywords: conductive concrete, multifunctionality, piezoresistivity, heating and defrosting, shielding.

Concretos condutores multifuncionais: avanços, aplicações e desafios para uma infraestrutura inteligente.

RESUMO

Este artigo apresenta os fundamentos e a evolução das pesquisas sobre as principais funcionalidades desenvolvidas com materiais cimentícios condutivos. Concretos condutivos multifuncionais representam uma inovação no campo dos materiais cimentícios, apresentando não apenas capacidades estruturais, mas também propriedades elétricas, térmicas e sensoriais, atuando como materiais auto-sensores. As funções propostas são: a) Função de percepção de deformações e danos estruturais: capacidade de detectar deformações e danos em uma estrutura submetida a esforços, sem a necessidade de sensores aderidos ou embutidos no material. b) Função de aquecimento e degelo por efeito Joule: utilizada em aplicações como aquecimento resistivo (por exemplo, degelo ou aquecimento de edificações e infraestruturas). c) Função de blindagem contra interferência eletromagnética (EMI): baseada no efeito de blindagem que a própria estrutura condutiva exerce sobre o campo eletromagnético que a atravessa.

Palavras-chave: concreto condutivo, multifuncionalidade, piezorresistividade, aquecimento e descongelamento, blindagem.

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. +52 1 983 419 8241, alcompat.int@gmail.com, Página Web: www.alcompat.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

Durante casi 2000 años, el hormigón ha sido utilizado principalmente como material estructural, apreciado fundamentalmente por su capacidad para soportar cargas. Como material dieléctrico, es decir, mal conductor de la electricidad, la adición de materiales conductores como puede ser fibra de carbono, polvo de grafito o fibras de acero, lo transforma en un material conductor, estableciéndose así la posibilidad de realizar más funciones aparte de la estrictamente estructural, es decir, transformarse en un material multifuncional. Entre las funciones que puede desarrollar un material cementicio conductor se pueden enumerar las siguientes:

- a) **Función de percepción de la deformación** en régimen elástico de una estructura al estar sometida a un esfuerzo, sin llevar algún sensor adherido o embebido en él mismo (D'Alessandro et al. 2016).
- b) **Función de percepción del daño estructural.** La detección en tiempo real permite diferenciar entre daños estacionarios, evolutivos, permanentes o reversibles, (Baeza et al. 2013; Chung, 2024; Galao et al. 2014; Konsta-Gdoutos and Aza, 2014).
- c) **Función de calefacción y deshielo.** Calefacción por resistencia (por ejemplo, deshielo y calefacción en edificaciones, (Anur Oumer et al. 2024; D.D.L. Chung, 2004a; Yehia and Tuan 1999).
- d) **Función de apantallamiento EMI.** Esta función se basa en el apantallamiento que una estructura conductora ejerce sobre el campo electromagnético que la atraviesa (Chung, 2000; Kumar et al. 2021; Zornoza et al. 2010).
- e) **Función de ánodo para extracción electroquímica de cloruros y protección catódica.** Esta función se basa en la utilización de una pasta de cemento conductora que actúe como ánodo para la aplicación de la técnica de extracción electroquímica de cloruros y la protección catódica (Bertolini et al. 2004; J. Carmona, Garcés, and Climent, 2015; Pérez, Climent, and Garcés, 2010; Tritthart, 1998; Vennesland and Opsahl, 1989).

Los materiales cementicios han recibido gran atención a consecuencia de sus propiedades mecánicas y de su importancia como materiales estructurales. Sin embargo, se reconoce continuamente la necesidad de un material estructural capaz de contener funciones no estructurales reteniendo buenas propiedades estructurales. No obstante, la necesidad de que una estructura sea capaz de aportar funciones no estructurales manteniendo unas buenas propiedades estructurales, es una realidad que está siendo reconocida de forma creciente. Esto es debido a que el uso de un material estructural multifuncional (es decir, un material estructural que engloba a un material funcional no estructural) en lugar de una combinación de materiales estructurales no funcionales y materiales funcionales no estructurales, reduce costes, mejora la durabilidad y la capacidad de reparación, aumenta el volumen funcional, evita la degradación mecánica y simplifica el diseño (Chung, 2024).

El hormigón conductor multifuncional se ha desarrollado como una respuesta a la necesidad de materiales estructurales capaces de interactuar con su entorno de forma activa. Esta capacidad se logra mediante la incorporación de aditivos conductores en la matriz cementicia, los cuales permiten que el hormigón no solo soporte cargas, sino que también transmita señales eléctricas, genere calor o trabaje como sensor para aplicaciones de monitorización de la salud estructural (SHM, por sus siglas en inglés). Esta multifuncionalidad lo posiciona como un componente clave en el desarrollo de infraestructuras inteligentes y resilientes (Qin et al. 2024). Su implementación a gran escala aún enfrenta desafíos importantes, como el costo de los materiales nanoestructurados, la necesidad de electrodos cableados y la dificultad de lograr una dispersión uniforme de las adiciones conductoras (ver Figura 1).

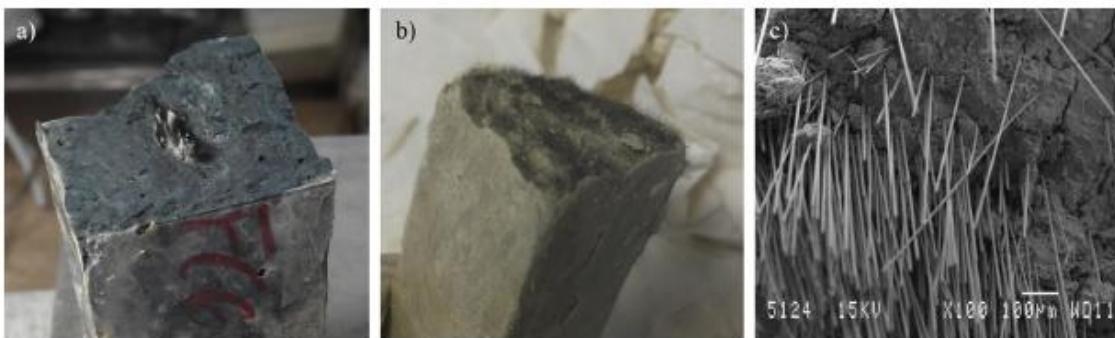


Figura 1. (a) Aglomeración de fibras debido a una pobre dispersión de fibras. (b) Probeta con orientación preferente de fibras a lo largo del eje longitudinal. (c) Imagen SEM de una pasta de cemento alcalino con fibras de carbono (Vilaplana et al. 2016).

Sin embargo, los avances en investigación de materiales y procesos constructivos ofrecen un panorama prometedor para su adopción. El desarrollo de estos materiales tendrá un impacto sobre las industrias relacionadas con la construcción, calefacción, transporte de energía, centrales eléctricas, comunicación telefónica, industria electrónica y seguridad (Segundo et al. 2021; Song, Li, and Xu, 2024).

2. PIEZORRESISTIVIDAD EN MATERIALES CEMENTICIOS CONDUCTORES: SENSORES DE DEFORMACIÓN Y DE DAÑO.

La función de percepción de la deformación es la capacidad de un material estructural para detectar su propia deformación cuando está sometido a una carga externa. La percepción de deformaciones (que está relacionada con la percepción de tensiones, pero es diferente a la percepción de daños) resulta importante en aspectos como el control de vibración estructural, SHM o en la monitorización y control del tráfico.

Las aplicaciones convencionales de los sensores de tensión o deformación abarcan desde sensores para componentes de la industria aeronáutica o del automóvil, hasta sensores para estructuras de ingeniería civil, como los viaductos, incluso sensores de control de peso del tráfico en autopistas sin necesidad de detener los vehículos. Dentro de la primera categoría se tiende a colocar pequeños sensores (normalmente pastas o morteros de cemento) que deben competir con sensores de presión de silicio. En los otros casos se puede ir a sensores mayores (por ejemplo, elementos prefabricados de hormigón o mortero) compitiendo con sensores acústicos, de silicio, neumáticos o inductivos (Baeza et al. 2011; Ivorra et al. 2010; Shi and Chung, 1999).

Se ha observado que los materiales cementicios con una adición de fibras cortas de carbono, nanofibras de carbono o nanotubos de carbono, son capaces de percibir su propia deformación, ver Figura 2. Esto es posible gracias a las variaciones producidas en su resistividad eléctrica (Camacho-Ballesta et al. 2016). En ensayos realizados en laboratorio se ha registrado que bajo tensiones de tracción la resistividad aumenta, debido a la apertura de micro-fisuras o incluso al arrancamiento de fibras dentro de la matriz. Esto es posible gracias a las variaciones producidas en su resistividad eléctrica (Han, Ding, and Yu, 2015). Por el contrario, al someter el material a esfuerzos de compresión se obtiene el efecto opuesto, de disminución de resistividad, que se relaciona con el reacoplamiento de las fibras al cerrarse las microfisuras. Este fenómeno electromecánico se conoce como piezorresistividad, y nos permite utilizar medidas de resistencia eléctrica (tanto de corriente directa, DC, como corriente alterna, AC) para monitorizar el estado de deformación de las probetas, actuando el propio material cementicio como sensor de deformación.

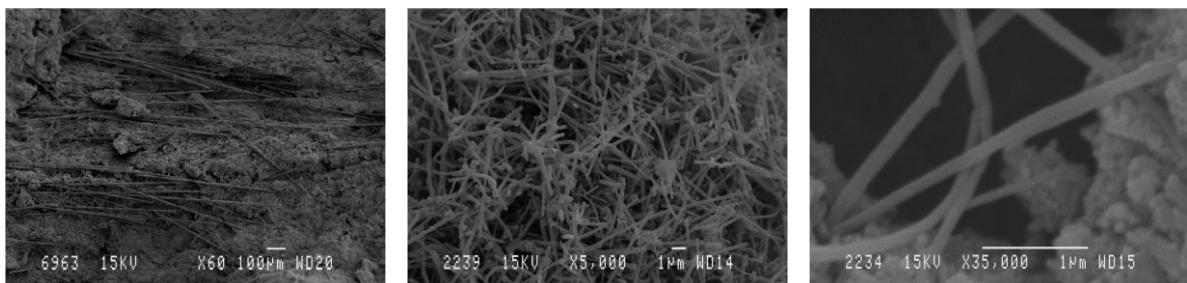


Figura 2. Imágenes de fibras de carbono (izquierda) y nanofibras de carbono (centro y derecha) embebidas en matrices cementicias.

Uno de los parámetros más interesantes del fenómeno de percepción de la deformación es la máxima y mínima cantidad de material conductor necesario para observar este comportamiento. Se define el *umbral de percolación* como la mínima cantidad de fibras necesaria para producir un camino conductor continuo a través del material, es decir, para asegurar el contacto entre fibras sin que haya discontinuidades. A partir de este punto mayores adiciones de material conductor no implican variaciones significativas de la conductividad eléctrica del material. El umbral de percolación se expresa normalmente como porcentaje en masa o en volumen respecto de la cantidad de cemento en la mezcla. Antes de alcanzar el umbral de percolación, con pequeñas cantidades de adiciones conductoras, la resistencia eléctrica del compuesto disminuye abruptamente, ver Figura 3, pudiendo la resistividad del material llegar a ser del orden de pocos ohm·cm en algunos casos. En el caso de fibras de carbono cortas, para un determinado porcentaje en volumen, el umbral de percolación depende en gran medida de la longitud de las fibras empleadas y de la relación de aspecto, y se sitúa habitualmente entre 0.1% y 0.5%, en volumen. Cuando la longitud de la fibra aumenta, el umbral de percolación disminuye. Es de destacar que no es imprescindible llegar al umbral de percolación para conseguir la función de percepción de la deformación en el material compuesto, ya que no es necesario alcanzar elevadas conductividades para observar el comportamiento piezorresistivo (Baeza et al. 2010).

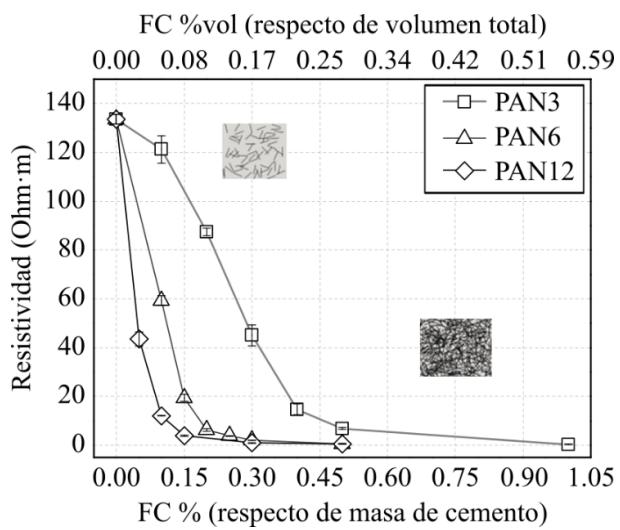


Figura 3. Detección del umbral de percolación a través de la resistividad en una pasta de cemento con adición de fibras de carbono de 3 mm, 6mm y 12mm de longitud. FC % se corresponde con el porcentaje de adición de fibras de carbono, y PAN hace referencia al tipo de fibra de carbono identificado por su precursor (poliacronitrilo).

En particular, el factor de galga óptimo —definido como la sensibilidad a la deformación expresada como el cambio relativo en la resistividad por unidad de deformación— se alcanza típicamente

cerca del umbral de percolación. Más allá de este punto, el factor de galga tiende a disminuir a medida que la red conductora se vuelve más estable y menos sensible a la deformación (García-Macías et al. 2017).

Las fibras no son los sensores, simplemente potencian la piezoresistividad del material compuesto, que es el verdadero sensor. Por tanto, siempre será preferible la menor cantidad de material conductor empleado, ya que conlleva menores costes de fabricación y mejor trabajabilidad. La Figura 4 muestra un ejemplo de cómo se relaciona la resistencia eléctrica del material cementicio conductor con la tensión y la deformación a la que se somete en ensayos de compresión, en régimen elástico (del Moral et al. 2021). Se observa una casi perfecta correlación entre los parámetros mecánicos y eléctricos. Esto permitiría claramente poder determinar con cierta precisión el estado tensional de un elemento estructural conociendo su resistencia eléctrica en un instante dado.

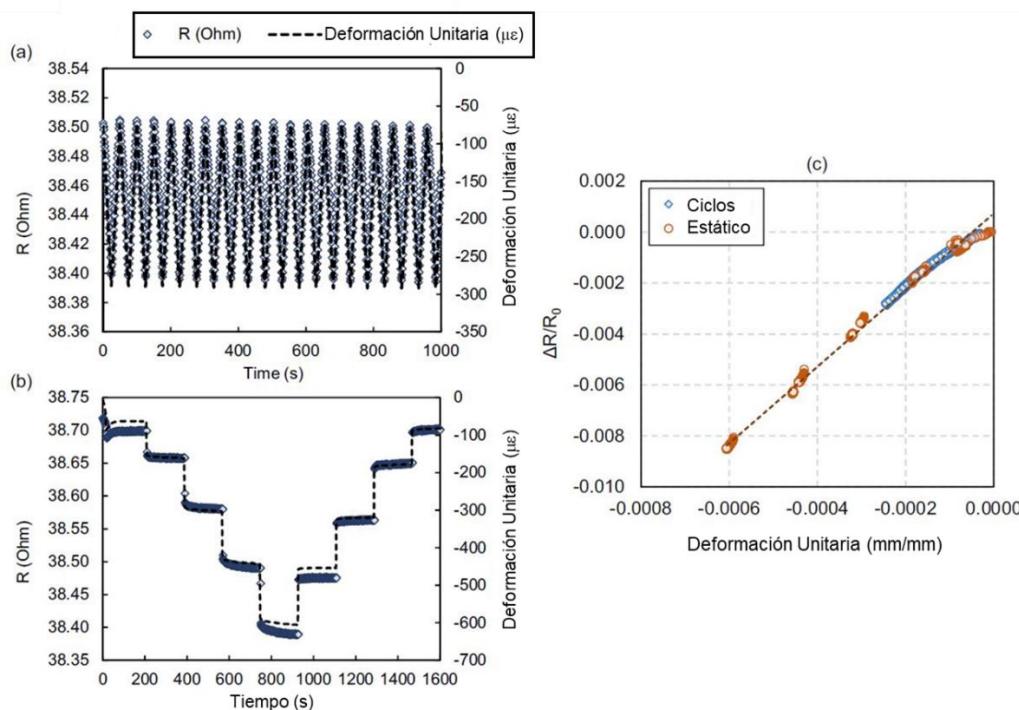


Figura 4. Ensayos de percepción de la deformación con pastas de cemento dopadas con adiciones híbridas (1% nanotubos de carbono y 5% polvo de grafito) tras 28 días de curado saturado en agua. (a) y (b) muestra la resistencia eléctrica (ohm) y la deformación (microdeformaciones unitarias) frente al tiempo, para ensayo cíclico de carga y descarga, y para cargas estáticas, respectivamente; (c) muestra el cambio fraccional de la resistencia eléctrica ($\Delta R/R_0$) frente a la deformación unitaria (mm/mm). (Adaptado de del Moral et al. 2021)

Como se ha mencionado anteriormente, a la hora de cuantificar el nivel de percepción del material por efecto piezoresistivo se utiliza el denominado factor de galga. Al igual que en las galgas extensométricas (de constantán o cromo-níquel), se define el factor de sensibilidad de la galga como una constante K que es la relación entre la variación unitaria de la resistividad y la deformación unitaria longitudinal del hilo, cuando la galga está sometida a una deformación. Matemáticamente el factor de galga (λ) se expresa como:

$$\lambda = \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\frac{dL}{L}}$$

siendo dp/ρ el cambio fraccional de la resistividad eléctrica, y dL/L corresponde a la deformación axial en el caso de un estado de esfuerzo unidimensional.

El cambio de la resistencia eléctrica del material bajo esfuerzos se debe a la modificación que sufre la resistividad del material, es decir, que es una propiedad intrínseca del material, lo que posibilita que se pueda observar este comportamiento. En la Figura 5 se presentan diferentes formas de aplicación de los denominados compuestos cementicios autodetectables (en bulk, es decir, siendo el propio material estructural el sensor, con sensores continuos en la cara superior e inferior, o bien con pequeños sensores adheridos) (Han et al. 2015).

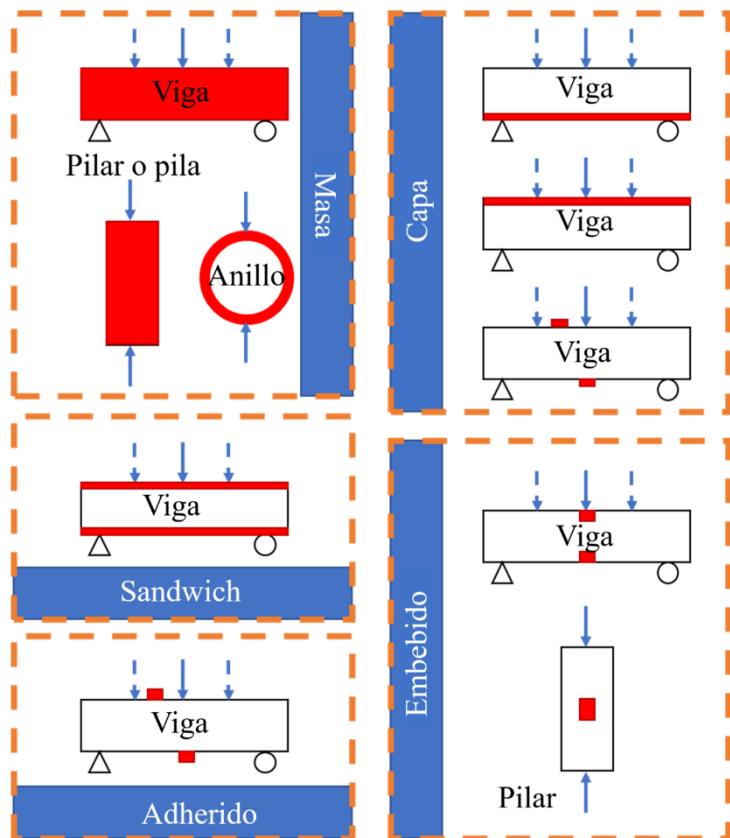


Figura 5. Formas de aplicación de compuestos cementicios autodetectables, publicado por Han, B. et al., 2015, en Elsevier. (Adaptado de Han et al. 2015)

La detección temprana del daño estructural es un factor clave para la prevención de lesiones mayores en la estructura. Esto requiere que el sistema de detección registre los daños que se producen en el material a nivel microscópico. Los estudios recientes han mostrado que estos materiales pueden integrarse eficientemente con tecnologías de SHM, reduciendo los costos de mantenimiento y aumentando la seguridad en tiempo real. (Baeza et al. 2013; Galao et al. 2014; Konsta-Gdoutos and Aza 2014).

Se han desarrollado diferentes aplicaciones utilizando pastas conductoras como sensores en elementos estructurales reales. Así, Garcés et al. instrumentalizaron una viga de hormigón armado mediante distintos sensores de pasta de cemento con fibras cortas de carbono, ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** La correlación lineal entre deformación y resistencia eléctrica es clara, (Garcés et al. 2010).

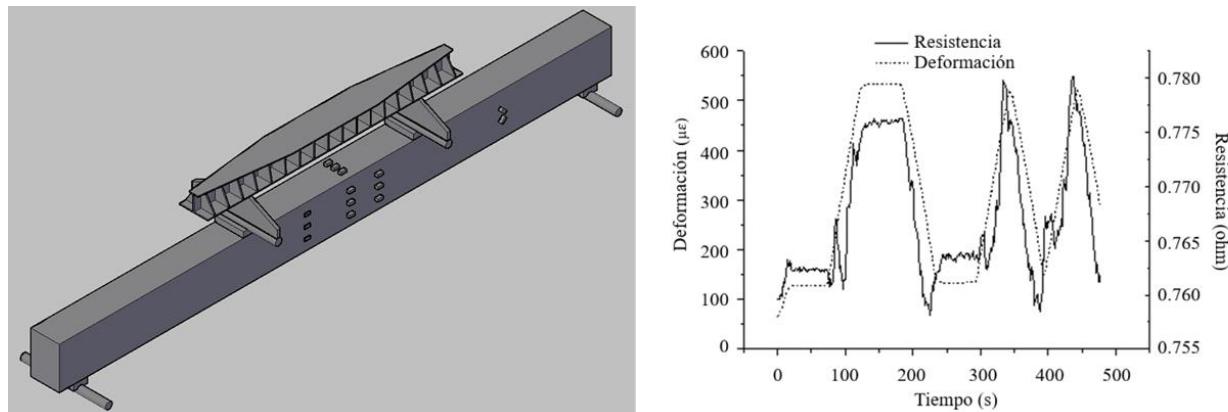


Figura 6. (izquierda) Disposición de galgas de pasta de cemento conductora en viga de hormigón armado sometida a ensayo de flexotracción. (derecha) Esquema de la monitorización de la deformación y la resistencia eléctrica frente al tiempo de uno de los sensores adheridos a la viga ensayada.

Como se ha planteado en la introducción, la monitorización del tráfico, parte esencial de la gestión y control del tráfico, implica la visualización en tiempo real del mismo, necesitando de sensores de deformación, que pueden ser ópticos, eléctricos, magnéticos o acústicos. Habitualmente los sensores se encuentran adheridos o embebidos en el pavimento de las vías de transporte que se quieren monitorizar. Las limitaciones de este tipo de sensores son: (i) un alcance limitado, (ii) una escasa durabilidad, y (iii) un coste demasiado elevado como para permitir un uso extensivo de los mismos. Gracias a una nueva tecnología se puede emplear el mismo hormigón del firme como sensor, sin necesidad de sensores adheridos o embebidos. Puesto que el propio material estructural es el sensor, se puede controlar la infraestructura completa, con una gran durabilidad y un pequeño incremento de coste, solucionando las tres limitaciones expuestas anteriormente para los sensores tradicionales, ver Figura 7 (Birgin et al. 2022; Han et al. 2015; Shi and Chung 1999).

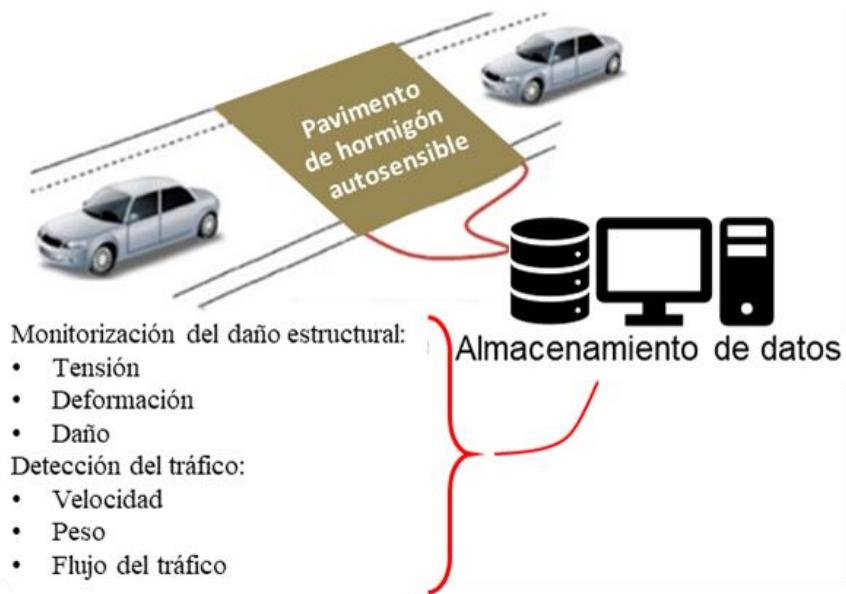


Figura 7. Diagrama esquemático de la aplicación de la función de percepción en pavimentos de hormigón. (Adaptado de Han et al. 2015)

Una nueva aplicación de la función de percepción se ha desarrollado por García -Macias y Ubertini (García-Macías and Ubertini 2019), mediante la utilización de ladrillos inteligentes para monitorear edificios de mampostería. De manera similar a un hormigón conductor sensible a sus

deformaciones, y mediante la incorporación de rellenos de acero especiales con alta resistencia a la temperatura, los ladrillos piezoresistivos inteligentes se pueden utilizar como sensores de tensión, que se muestran en la Figura 8.

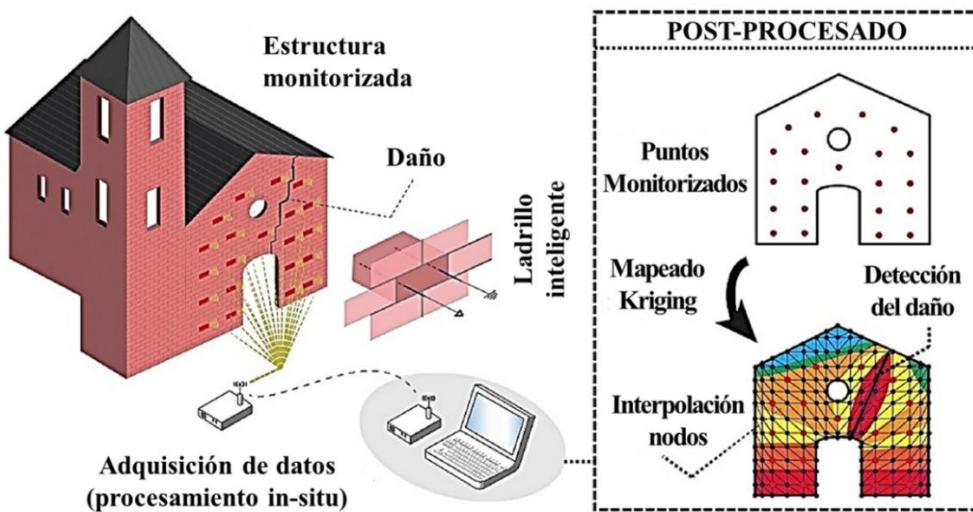


Figura 8. Esquema de aplicación de ladrillos inteligentes para control de estado de estructuras de mampostería. (Adaptado de García-Macías and Ubertini 2019)

Los resultados de la simulación numérica mostraron la posibilidad de este sensor para la detección de daños ya sea en edificios nuevos o edificios existentes, lo que tiene un interés significativo en la protección de estructuras de mampostería patrimoniales (Downey et al. 2018; García-Macías and Ubertini, 2019). Recientemente, una validación en campo realizada sobre un edificio de mampostería a escala real ha confirmado adicionalmente la eficacia de los ladrillos inteligentes para fines de SHM bajo condiciones ambientales reales (Meoni et al. 2025).

3. FUNCIÓN DE CALEFACCIÓN Y DESHIELO.

Una de las funciones más prometedoras que puede realizar un material conductor a base de cemento 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. La capacidad de generación de calor de los materiales en base cemento conductores de electricidad está asociada con su resistencia, como lo expresa la primera ley de Joule (Anur Oumer et al. 2024; Park et al. 2024). Controlando la potencia eléctrica suministrada, se puede ajustar la temperatura del compuesto, ver Figura 9. Cuando este concepto se aplica a los materiales estructurales, es posible utilizar el propio material para provocar el derretimiento del hielo en su superficie (o para evitar su formación), (Farcas et al. 2021).



Figura 9. Control de la evolución de la temperatura mediante cámara termográfica.

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. Los compuestos en base cemento multifuncionales tienen una alta integridad estructural con las estructuras originales (ver Figura 10). 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).



Figura 10. Aplicación real de deshielo en pavimentos conductores. (Adaptado de Tuan and Yehia, 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 aplicaciones.

Los estudios iniciales sobre esta temática, (Chung, 2004b; Yehia and Tuan, 1999) destacaron el potencial de los compuestos cementicios conductores para aplicaciones de auto-calentamiento mediante el efecto Joule. Posteriormente, se han incorporado diversas adiciones conductoras en compuestos cementicios calefactables, y se han desarrollado amplios estudios experimentales en laboratorio, (Farcas et al. 2021; Galao et al. 2016; Gomis et al. 2015) (ver Figura 11).

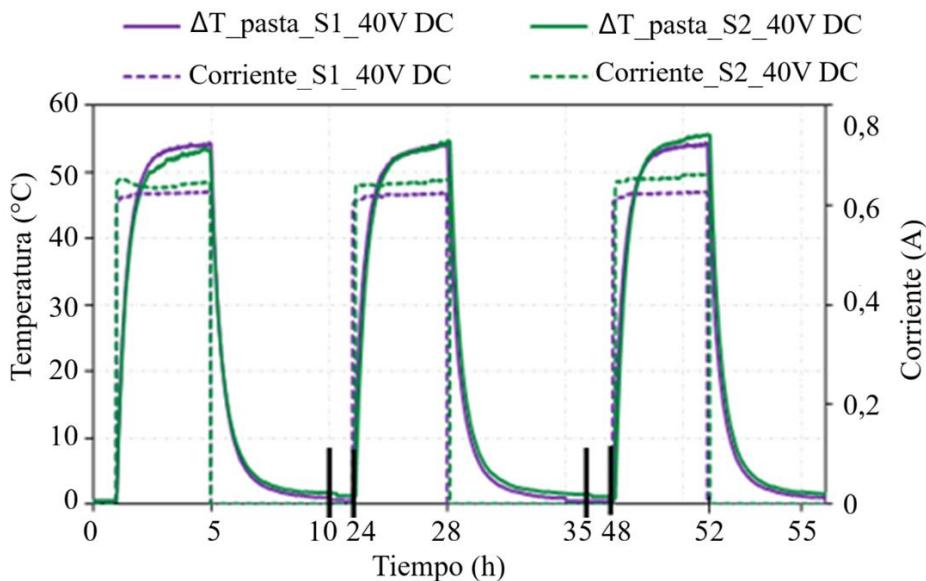


Figura 11. Variación de la temperatura (°C) y corriente eléctrica (A) controlada durante ensayo, frente al tiempo (h), de dos probetas de pasta de cemento, para tres ensayos consecutivos en corriente continua a 40 V. (Farcas et al. 2021)

Diferentes estudios han permitido constatar la eficacia de estos materiales para aplicaciones de calefacción y deshielo (Rahman et al. 2022). Sigue habiendo problemas para su aplicación en una escala real. Por ejemplo, control de la temperatura del hormigón, estableciendo dosificaciones que optimicen su respuesta, para prevenir problemas de durabilidad en infraestructuras. Los estudios de Deng presentaron un enfoque innovador para controlar activamente la temperatura en el hormigón, optimizando una mezcla autorregulable diseñada para responder a variaciones extremas de temperatura (Deng et al. 2023; Park et al. 2024) investigaron el uso de módulos de CNT de pared múltiple (MWCNT) embebidos en losas de hormigón para aplicaciones de deshielo a gran escala, demostrando con éxito su eficiencia térmica en condiciones reales. Otro estudio interesante fue la instalación de una rampa de estacionamiento con calefacción eléctrica utilizando hormigón calefactable en China en condiciones de muy baja temperatura. Las superficies de la rampa alcanzaron una densidad de potencia promedio de 200–300 W/m², suficiente para una remoción eficaz del hielo en condiciones invernales (Rao et al. 2018; Sassani et al. 2018) describieron toda la secuencia de diseño, producción, colocación y evaluación del desempeño del primer sistema de pavimento calefactable de hormigón eléctricamente conductor (ECON), mediante el uso de fibras de carbono, en un aeropuerto de los Estados Unidos. En este proyecto se seleccionó ECON reforzado con fibras de carbono, apto para pistas y calles de rodaje. A pesar de la resistividad elevada observada en el ECON preparado en planta, el sistema calefactable instalado ofreció un rendimiento confiable en pruebas invernales, generando de manera constante una densidad de potencia superficial entre 300 y 350 W/m², derritiendo eficazmente el hielo y la nieve acumulados. En otro estudio (Li et al. 2022) se incorporó mezcla de grafito y fibra de carbono como aditivos conductores, obteniendo un hormigón asfáltico conductor. El resultado fue el derretimiento activo de hielo y nieve en su superficie que había sido vertido sobre tableros de puentes metálicos durante el invierno. En 2022 los estudios de Li (Li et al. 2022) se centraron en habilitar el derretimiento activo de hielo y nieve en superficies de hormigón asfáltico vertido sobre tableros de puentes metálicos durante el invierno. Al incorporar grafito y fibra de carbono como aditivos conductores, se desarrolló una mezcla de hormigón asfáltico conductor (CGA-10). El estudio examinó cómo la variación en la cantidad de estos componentes influye en la resistividad eléctrica de la mezcla, así como en sus propiedades generales como pavimento. El desempeño térmico fue evaluado mediante ensayos de calentamiento, y la eficiencia de deshielo fue analizada en pruebas en interiores. La

combinación de 0.4% de fibra de carbono y 30% de grafito logró establecer una red conductora robusta en la matriz asfáltica. Las fibras de carbono contrarrestaron el impacto negativo del grafito sobre el desempeño mecánico, reforzando la mezcla sin comprometer la conductividad. Bajo condiciones de prueba, la mezcla optimizada CGA-10 alcanzó una eficiencia de conversión térmica del 78.85% y derritió el 50.03% del hielo en ensayos estandarizados de deshielo. El equipo de Faneca (Faneca et al. 2020) realiza un estudio en 2020 tanto en laboratorio como en entornos industriales con el objetivo de formular un hormigón conductor a base de fibras de carbono recicladas, orientado a su uso en mobiliario urbano a temperaturas bajo cero, con resultados prometedores. Recientemente, se ha llevado a cabo una revisión exhaustiva de la investigación existente sobre el hormigón cementicio eléctricamente conductor (Anur Oumer et al. 2024), denominado ECCC, abarcando métodos para mejorar la conductividad del hormigón, análisis del comportamiento de transferencia térmica y evaluaciones de desempeño mediante experimentos de laboratorio y ensayos a pequeña escala en campo.

Los resultados coinciden en que los pavimentos ECCC pueden mejorar significativamente la gestión vial durante el invierno, incrementando la seguridad y reduciendo los retrasos por condiciones meteorológicas, además de ofrecer una alternativa ecológica frente a los métodos químicos y mecánicos de deshielo. A pesar de estas ventajas, su implementación generalizada aún se ve limitada por desafíos relacionados con el desarrollo de prácticas constructivas rentables, la garantía de durabilidad a largo plazo y la maximización de la eficiencia energética. Abordar estos obstáculos será fundamental para una adopción más amplia de la tecnología ECCC.

4. TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS UTILIZANDO PASTAS CEMENTICIAS CONDUCTORAS COMO ÁNODO.

Cuando en una estructura de hormigón armado se produce la corrosión de su armadura, es necesario reparar la estructura si se desea prolongar su uso; de lo contrario, existe un alto riesgo de colapso. El método tradicional para estructuras contaminadas por cloruros es la sustitución de los elementos estructurales afectados por la corrosión. Sin embargo, existen nuevos métodos, como la protección catódica, la realcalinización electroquímica o la extracción electroquímica de cloruros (EEC), que permiten evitar la sustitución de elementos estructurales. El interés de estas técnicas, conocidas como Métodos de Mantenimiento Electroquímico, reside principalmente en su capacidad de eliminar los agentes agresivos, manteniendo la cobertura del hormigón y permitiendo la pasivación de las armaduras.

Consisten básicamente en aplicar un campo eléctrico entre la varilla de acero (el polo negativo o cátodo) y un electrodo depositado externamente en la superficie del hormigón (el polo positivo o ánodo), como puede ser una capa de material cementicio conductor por adición de algún material conductor como el grafito, por ejemplo. Dado que los cloruros son iones con carga negativa, el campo de fuerza aplicado provoca su migración desde la varilla hasta el electrodo exterior a través de los poros del hormigón. Posteriormente, manteniendo el campo eléctrico con menor intensidad, esteremos aplicando una protección catódica de la armadura (ver Figura 12).

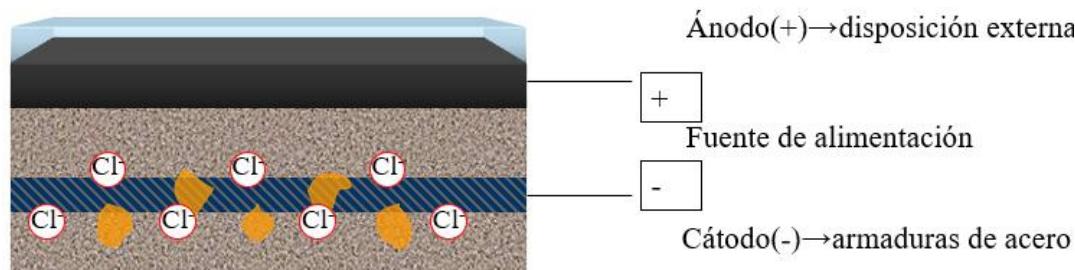


Figura 12. Esquema de la técnica de extracción electroquímica de cloruros.

La Figura 13 muestra un ejemplo de EEC aplicada a probetas tipo columna (pilar) de sección circular, mostrándose los perfiles de Cl^- antes y después de la EEC, y el perfil de eficiencias, en el que se empleó un ánodo de malla de $\text{Ti}-\text{RuO}_2$ y una capa proyectada de pasta conductora de cemento y grafito y sistema de humectación constante. El promedio de eficiencia fue del 79,44% (Carmona et al. 2015).

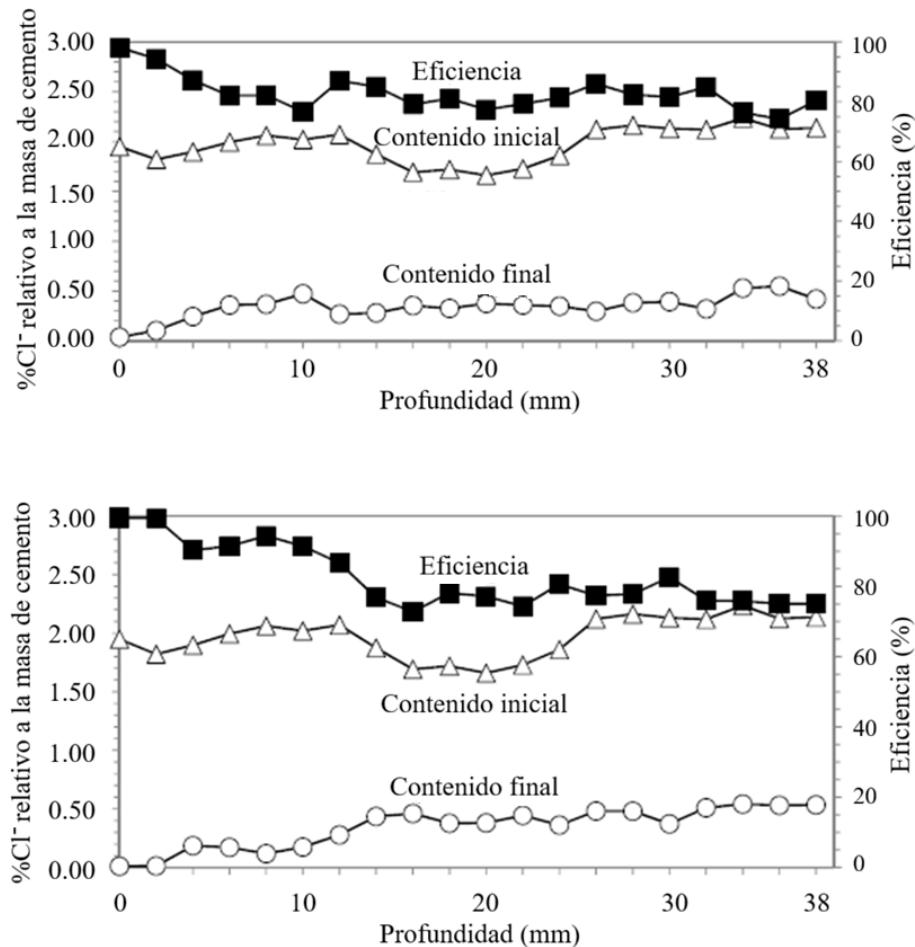


Figura 13. Ejemplo de ensayo de extracción de cloruros en pilares de base cilíndrica, indicando el % de cloruros respecto a la masa de cemento (ánodo) así como la eficiencia en % (cátodo), frente a la profundidad (mm) de la toma de muestra. (a) ánodo de malla de $\text{Ti}-\text{RuO}_2$; (b) capa proyectada de pasta conductora de cemento y grafito (Adapado de Carmona et al. 2015).

Las primeras investigaciones de las que se tiene conocimiento sobre este método se remontan a los primeros años 70. Lankard, Morrison y otros investigadores norteamericanos, en los laboratorios de Batelle Columbus (Ohio), desarrollan los primeros ensayos de EEC sobre probetas cilíndricas de hormigón armado fabricadas con adición de cloruros (Lankard et al. 1975). Por su parte Slater, del Departamento de Transportes de Topeka (Kansas), realiza las primeras aplicaciones prácticas sobre tableros de puentes contaminados por cloruros. En 1989 se inscribe la primera patente para EE.UU, titulada “Removal of Chlorides from Concrete”, y denominada “NORCURE”, sobre un método de extracción de cloruros del hormigón armado (Vennesland and Opsahl, 1989). En 1998 Tritthart publica, como se ha dicho antes, una completa revisión del método de EEC para resaltar sus aspectos científicos. Después de una detallada descripción del método y de la historia de su aplicación, se detiene en los movimientos y la distribución iónica provocados por el tratamiento, medidos por los cambios de concentración en la red de poros. Sigue un completo estudio sobre efectos colaterales no deseados del método, como son las posibles reacciones árido-álcali, la

disminución de la adherencia entre acero y hormigón y la pérdida de resistencia a tracción del acero por la acción del hidrógeno producido, (Tritthart, 1998). El grupo de Bertolini, Yu y Page dedica sus investigaciones, en la aplicación de estas técnicas, a los efectos del tratamiento sobre las propiedades mecánicas aplicando densidades de corriente de un rango entre los 5 mA/m^2 , utilizados en protección catódica, a los 5 A/m^2 de la EEC (Bertolini, Yu and Page, 1996). En todos estos trabajos el ánodo externo se compone de malla de titanio embebida en capas de fibra de celulosa revestidas por un geotextil y empapadas en una solución saturada de Ca(OH)_2 . Andrade, Castellote y otros, realizan el primer estudio sobre modelización matemática de la EEC. Desde la ecuación para el flujo iónico de Nernst-Planck desarrollan mediante sus investigaciones fórmulas para calcular el número de transporte de cloruros y del coeficiente de migración, con el fin de modelizar la eficiencia del tratamiento (Andrade et al. 1995). El equipo formado por Fajardo y Escadeillas, entre otros, este equipo estudia la microestructura de la interfase acero-hormigón después de la EEC mediante espectroscopía de rayos X y escaneado con microscopio electrónico, (Fajardo, Escadeillas and Arliguie, 2006). El equipo formado por Climent, Garcés y otros, en 2005 publican un novedoso trabajo sobre la influencia que la disposición de las barras del armado tiene en la eficiencia de la EEC (Garcés et al. 2005). Posteriormente, este mismo equipo en 2006 publica otro trabajo de estructura similar al anterior, pero con objetivos diferentes. En este caso se trataba de averiguar la influencia sobre la eficiencia del método del punto de toma de muestras, de la densidad de corriente y de la introducción de paradas en el tratamiento, (Climent et al. 2006).

Es importante clarificar que la *Protección Catódica* se aplica a las construcciones ya contaminadas por cloruros para controlar su grado de corrosión, y la *Prevención Catódica*, para tratar nuevas estructuras susceptibles de sufrir contaminación por cloruros, con el objeto de incrementar su resistencia a la corrosión y con ello, su vida útil, mediante densidades de corriente mucho menores. Lazzari y Pederferri, en un artículo de referencia obligada, establece las consecuencias negativas de estas técnicas y el modo de controlarlas; las condiciones operativas del potencial y la corriente, los problemas relativos a la capacidad de extracción, y la posibilidad de lograr la condición de protección sin caer en el riesgo de la fragilización por acción del hidrógeno en las estructuras de hormigón pretensado. En este trabajo se incluyen asimismo ejemplos de diseño, ejecución, aplicación y monitorización tanto de protección como de prevención catódicas. (Lazzari and Pederferri 2006).

Por otra parte, es a finales de la década de los 90 cuando se establece la posibilidad del uso de un material cementicio conductor como ánodo en la aplicación de la técnica de protección catódica. Destacan 2 trabajos en relación a este tema. Primero el llevado a cabo por Fu y Chung, en 1995 (Fu and Chung, 1995), un interesante trabajo sobre el empleo de morteros reforzados con fibras de carbono como material de contacto para la PC. Encontraron que una pequeña adición de fibras de carbono al nuevo mortero que se aplica sobre la superficie del antiguo mortero a tratar mediante PC, para servir de ánodo en el tratamiento, reduce tanto la resistividad del contacto como la resistividad volumétrica del nuevo mortero. El segundo de Bertolini y colaboradores, en 2003, que estudiaron la eficiencia de los ánodos formados por morteros cementicios conductores, en la PC para el acero de las armaduras del hormigón. Estudiaron el comportamiento de estas capas haciendo el papel de ánodo en el proceso de la PC. Se trata de morteros de cemento con la adición de fibras de carbono recubiertas de níquel, (Bertolini et al. 2004). Pérez et al. son los autores de la primera aplicación de ánodos cementicios conductores en la aplicación de la técnica de extracción electroquímica de cloruros, (Pérez et al. 2010).

5. OTRAS APLICACIONES.

Existe un gran número de aplicaciones distintas a las mencionadas. Por ejemplo, la toma de tierra es necesaria en edificios y otras estructuras en las que estén funcionando equipos eléctricos. La protección antirrayos es necesaria en edificios elevados. Algunos metales, como el acero, son

habitualmente usados para estas aplicaciones. Sin embargo, el uso de hormigón conductor de la electricidad para disminuir el volumen de metal requerido es interesante desde el punto de vista de reducción de costes, mejora de la durabilidad y simplificación de la instalación. (Chung, 2003). Recientemente, la Dr. Chung ha publicado estudios relativos a propiedades capacitivas y piezopermitivas de hormigones para la autodetección de tensiones (Chung and Ozturk, 2024; Ozturk and Chung, 2024). Otros tantos esfuerzos se vienen destinando a aspectos energéticos del hormigón multifuncional (Abden et al. 2024).

Finalmente, son destacables los esfuerzos iniciales para imprimir en 3D hormigones conductores capaces de percibir su propia deformación, ya que demuestran un potencial prometedor para la creación de estructuras en las que zonas localmente críticas puedan transformarse en nodos sensores. Estos nodos podrían desempeñar un papel fundamental en la monitorización tanto del proceso de impresión como de la funcionalidad y seguridad de la estructura a lo largo de su vida útil (Liu et al. 2024; Sousa et al. 2024).

6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS.

El desarrollo de hormigones conductores con funcionalidades avanzadas representa un campo emergente y prometedor dentro de la ingeniería de materiales para infraestructura. Estos materiales no solo cumplen funciones estructurales tradicionales, sino que también incorporan capacidades inteligentes que permiten responder activamente a estímulos del entorno. Entre las aplicaciones más destacadas se encuentran:

- a) La monitorización estructural mediante piezorresistividad, medición de deformaciones y la detección de daños, así como la integración con sistemas energéticos y sensores.
- b) La función de calefacción y deshielo por efecto Joule. Los pavimentos de hormigón conductor con función de calefacción y deshielo constituyen una alternativa prometedora para infraestructuras inteligentes en climas fríos. No obstante, es fundamental continuar con la investigación aplicada y experimental a gran escala para optimizar su desempeño, garantizar su viabilidad económica y evaluar su impacto ambiental a largo plazo.
- c) La función de ánodo en la aplicación de técnicas electroquímicas. La pasta de cemento conductora se posiciona como una solución prometedora para la implementación de técnicas electroquímicas más eficaces y duraderas, al mismo tiempo que promueve la integración funcional entre los componentes del sistema y el sustrato estructural.

A pesar de los avances significativos en la formulación y caracterización de estos materiales, su implementación a gran escala aún enfrenta diversos desafíos técnicos y económicos. Entre ellos, destacan la dificultad de dispersar homogéneamente los materiales conductores en la matriz cementicia, el aumento de los costos asociados a los aditivos funcionales, el uso de electrodos de contacto y cableados así como la necesidad de asegurar la durabilidad y estabilidad de las propiedades eléctricas en condiciones reales de servicio.

No obstante, las investigaciones actuales continúan explorando nuevas combinaciones de materiales conductores (como nanotubos de carbono, grafeno, fibras metálicas y materiales reciclados), así como técnicas de fabricación innovadoras, incluida la impresión 3D, que permitan mejorar la eficiencia y reducir el impacto ambiental. En este contexto, el hormigón conductor se perfila como un componente clave para el desarrollo de infraestructuras inteligentes, resilientes y sostenibles en el futuro.

7. AGRADECIMIENTOS

F. Ubertini agradece profundamente el apoyo del Ministerio de Universidad e Investigación de Italia (MUR) a través de la subvención avanzada FIS2021 'SMS-SAFEST – Smart Masonry enabling SAFEtY-assessing STructures after earthquakes' (FIS00001797)

P. Garcés y O. Galao agradecen profundamente el apoyo del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades a través de la subvención PROYECTOS DE GENERACIÓN DE CONOCIMIENTO Y A ACTUACIONES PARA LA FORMACIÓN DE PERSONAL INVESTIGADOR PREDOCTORAL ASOCIADAS A DICHOS PROYECTOS, en el marco del Programa Estatal para la Investigación y el Desarrollo Experimental, del Plan Estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación 2024-2027 (Referencia PID2024-159695OB-C21), así como al Programa de Investigación e Innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea en virtud del Acuerdo de Subvención 760940.

8. REFERENCIAS

- Abden, Md Jaynul, Vivian W. Y. Tam, Jannatul Dil Afroze, Khoa N. Le. (2024). “*Energy Efficient Sustainable Concrete for Multifunctional Applications.*” Construction and Building Materials, 418:135213. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135213>.
- Andrade, C., J. M., Diez, A., Alamán, Alonso, C. (1995). “*Mathematical Modelling of Electrochemical Chloride Extraction from Concrete.*” [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00063-I](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00063-I).
- Oumer, A., Lee, C., Ahn, E., Gwon, S. (2024). “*Review on Self-Heating Electrically Conductive Cementitious Composites: Focus on Deicing and Electrical Curing.*” Construction and Building Materials, 439:137232. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.137232>.
- Baeza, F. J., Chung, D. D. L., Zornoza, E., Andión, L. G., Garcés, P. (2010). “*Triple Percolation in Concrete Reinforced with Carbon Fiber.*” ACI Materials Journal, 107(4):396–402.
- Baeza, F. J., Galao, O., Zornoza, E., Garcés, P. (2013). “*Effect of Aspect Ratio on Strain Sensing Capacity of Carbon Fiber Reinforced Cement Composites.*” Materials and Design, 51:1085–94. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.05.010>.
- Baeza, F. J., Zornoza, E., Andión, L. G., Ivorra, S., Garcés, P. (2011). “*Variables Affecting Strain Sensing Function in Cementitious Composites with Carbon Fibers.*” Computers and Concrete, 8(2):229–41. <https://doi.org/10.12989/cac.2011.8.2.229>
- Bertolini, L., Yu, S. W., Page, C. L. (1996). “*Effects of Electrochemical Chloride Extraction on Chemical and Mechanical Properties of Hydrated Cement Paste.*” Advances in Cement Research, 8(31):93–100. <https://doi.org/10.1680/adcr.1996.8.31.93>.
- Bertolini, L., Bolzoni, F., Pastore, T., Pedeferri, P. (2004). “*Effectiveness of a Conductive Cementitious Mortar Anode for Cathodic Protection of Steel in Concrete.*” Cement and Concrete Research, 34(4):681–94. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.10.018>
- Birgin, H. B., D’Alessandro, A., Favaro, M., Sangiorgi, C., Laflamme, S., Ubertini, F. (2022). “*Field Investigation of Novel Self-Sensing Asphalt Pavement for Weigh-in-Motion Sensing.*” Smart Materials and Structures, 31(8):085004. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac7922>.
- Camacho-Ballesta, C., Zornoza, E., Garcés, P., Zornoza, E. 2016. “*Performance of Cement-Based Sensors with CNT for Strain Sensing.*” Advances in Cement Research, 28(4):274–84. <https://doi.org/10.1680/adcr.14.00120>.
- Carmona, J., Garcés, P., Climent, M. A. (2015). “*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.*” Corrosion Science, 96:102–11. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.04.012>.
- Carmona, J., Climent, M.-Á., Antón, C., Vera, G., Garcés, P. (2015). “*Shape Effect of Electrochemical Chloride Extraction in Structural Reinforced Concrete Elements Using a New Cement-Based Anodic System.*” Materials, 8(6):2901–17. <https://doi.org/10.3390/ma8062901>.
- Chung, D. D. L. (2000). “*Cement-Based Materials for Stress Sensing by Electrical Resistance Measurement.*” Cement and Concrete Composites, 22(6):409–4017.
- Chung, D. D. L. (2003). *Multifunctional Cement-Based Materials.* edited by 2003 CRC Press.

Buffalo, New York, USA.

- Chung, D. D. L. (2004a). "Review Electrical Applications of Carbon Materials." *Journal of Materials Science*, 29:2645–61.
- Chung, D D L. (2004). "Self-Heating Structural Materials." *Smart Materials and Structures*, 13(3):562–65. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/13/3/015>.
- Chung, D. D. L. (2004b). "Self-Heating Structural Materials." *Smart Materials and Structures*, 13(3):562–65. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/13/3/015>.
- Chung, D. D. L. (2024). *Functional Materials*. Vol. 4. 2nd ed. edited by World Scientific.
- Chung, D. D. L., Ozturk, M. (2024). "Spatially Resolved Capacitance-Based Stress Self-Sensing in Concrete." *ISA Transactions*, 152:299–307. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2024.06.034>.
- Climent, M. A., Sanchez de Rojas, M. J., de Vera, G., Garces, P. (2006). "Effect of Type of Anodic Arrangements on Efficiency of Electrochemical Chloride Removal from Concrete." *ACI Materials Journal*, 103(4):243–50.
- D'Alessandro, A., Rallini, M., Ubertini, F., Materazzi, A. L., Kenny, J. M. (2016). "Investigations on Scalable Fabrication Procedures for Self-Sensing Carbon Nanotube Cement-Matrix Composites for SHM Applications." *Cement and Concrete Composites*, 65:200–213. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.11.001>.
- Deng, G., Zhang, M., Zhang, J., He, Y., Li, M. (2023). "Temperature Self-Controlled Concrete: Electro-Thermal Performance and Active Temperature Control Strategy." *Structures*, 58:105629. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2023.105629>.
- Downey, A., D'Alessandro, A., Laflamme, S., Ubertini, F. (2018). "Smart Bricks for Strain Sensing and Crack Detection in Masonry Structures." *Smart Materials and Structures*, 27(1):015009. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aa98c2>.
- Fajardo, G., Escadeillas, G., Arliguie, G. (2006). "Electrochemical Chloride Extraction (ECE) from Steel-Reinforced Concrete Specimens Contaminated by 'Artificial' Sea-Water." *Corrosion Science*, 48(1):110–25. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2004.11.015>.
- Faneca, G., Ikumi, T., Torrents, J. M., Aguado, A., Segura, I. (2020). "Conductive Concrete Made from Recycled Carbon Fibres for Self-Heating and de-Icing Applications in Urban Furniture." *Materiales de Construcción*, 70(339):e223. <https://doi.org/10.3989/mc.2020.17019>.
- 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):045010. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/abe032>.
- Fu, X., Chung, D. D. L. (1995). "Carbon Fiber Reinforced Mortar as an Electrical Contact Material for Cathodic Protection." *Cement and Concrete Research*, 25(4):689–94.
- Galao, O., Baeza, F. J., Zornoza, E., Garcés, P. (2014). "Strain and Damage Sensing Properties on Multifunctional Cement Composites with CNF Admixture." *Cement & Concrete Composites*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.11.009>.
- Galao, O., Bañón, L., Baeza, F. J., Carmona, J., Garcés, P. (2016). "Highly Conductive Carbon Fiber Reinforced Concrete for Icing Prevention and Curing." *Materials*, 9(4). doi:10.3390/ma9040281.
- Garcés, P., Fraile, J., Vilaplana-Ortego, E., Cazorla-Amorós, D., Alcocel, E. G. G., Andión, L. G. G. (2005). "Effect of Carbon Fibres on the Mechanical Properties and Corrosion Levels of Reinforced Portland Cement Mortars." *Cement and Concrete Research*, 35(2):324–31. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.013>.
- Garcés, P., Zornoza, E., Garcia Andion, L., Baeza, F. J., Galao, O. (2010). *Hormigones Conductores Multifuncionales*. edited by Editorial Club Universitario. Alicante: Editorial Club Universitario.
- García-Macías, E., D'Alessandro, A., Castro-Triguero, R., Pérez-Mira, D., Ubertini, F. (2017). "Micromechanics Modeling of the Uniaxial Strain-Sensing Property of Carbon Nanotube Cement-

- Matrix Composites for SHM Applications." *Composite Structures.* 163:195–215. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.12.014>.
- García-Macías, E., Ubertini, F. (2019). "Earthquake-Induced Damage Detection and Localization in Masonry Structures Using Smart Bricks and Kriging Strain Reconstruction: A Numerical Study." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics.* 48(5):548–69. <https://doi.org/10.1002/eqe.3148>.
- Gomis, J., Galao, O., Gomis, V., Zornoza, E., Garces, P. (2015). "Self-Heating and Deicing Conductive Cement. Experimental Study and Modeling." *Construction and Building Materials.* <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.042>.
- Han, Baoguo, Siqi Ding, and Xun Yu. 2015. "Intrinsic Self-Sensing Concrete and Structures: A Review." *Measurement* 59:110–28. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.048>.
- Ivorra, S., Garcés, P., Catalá, G., Andión, L. G., Zornoza, E. (2010). "Effect of Silica Fume Particle Size on Mechanical Properties of Short Carbon Fiber Reinforced Concrete." *Materials and Design.* 31(3):1553–58. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.09.050>.
- Konsta-Gdoutos, M. S., Aza, C. A. (2014). "Self Sensing Carbon Nanotube (CNT) and Nanofiber (CNF) Cementitious Composites for Real Time Damage Assessment in Smart Structures." *Cement and Concrete Composites.* 53. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.003>.
- Kumar, R., Sahoo, S., Joanni, E., Singh, R. K., Tan, W. K., Kar, K. K., Matsuda, A. (2021). "Recent Progress on Carbon-Based Composite Materials for Microwave Electromagnetic Interference Shielding." *Carbon.* 177:304–31. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.02.091>.
- Lankard, D. R., Slater, J. E., Hedden, W. A., Niesz, D. E. (1975). *Neutralization of Chloride in Concrete.*
- Lazzari, L., Pedeferri, P. (2006). *Cathodic Protection.* 1st ed. Polipress, Milano.
- Li, Z., Guo, T., Chen, Y., Lu, Y., Niu, X., Yang, X., Jin, L. (2022). "Study on Road Performance and Electrothermal Performance of Poured Conductive Asphalt Concrete." *Advances in Materials Science and Engineering.* 2022(1):2462126. <https://doi.org/10.1155/2022/2462126>.
- Liu, H., Laflamme, S., Cai, B., Lyu, P., Sritharan, S., Wang, K. (2024). "Investigation of 3D Printed Self-Sensing UHPC Composites Using Graphite and Hybrid Carbon Microfibers." *Sensors.* 24. <https://doi.org/10.3390/s24237638>.
- Meoni, A., Mattiacci, M., D'Alessandro, A., Virgulto, G., Buratti, N., Ubertini, F. (2025). "Automated Damage Detection in Masonry Structures Using Cointegrated Strain Measurements from Smart Bricks: Application to a Full-Scale Building Model Subjected to Foundation Settlements under Changing Environmental Conditions." *Journal of Building Engineering.* 100:111749. <https://doi.org/10.1016/J.JBEN.2024.111749>.
- del Moral, B., Baeza, F. J., Navarro, R., Galao, O., Zornoza, E., Vera, J., Farcas, C., Garcés, P. (2021). "Temperature and Humidity Influence on the Strain Sensing Performance of Hybrid Carbon Nanotubes and Graphite Cement Composites." *Construction and Building Materials.* 284:122786. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122786>.
- Ozturk, M., Chung, D. D. L. (2024). "Piezopermittivity of Cement Mortar with Various Water Contents and Its Application to Capacitance-Based Structural Self-Sensing of Stress." *Sensors and Actuators A: Physical.* 369:115206. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115206>.
- Park, S., Hwang, H., Lee, H., Chung, W. (2024). "A Full-Scale Test on Enhancing the Thermal Performance of a Concrete Slab Embedded with a MWCNT Heating Module Exposed to an Outdoor Environment." *Buildings.* 14(3):775.
- Pérez, A., Climent, M. A., Garcés, P. (2010). "Electrochemical Extraction of Chlorides from Reinforced Concrete Using a Conductive Cement Paste as the Anode." *Corrosion Science.* 52(5):1576–81. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.01.016>.
- Qin, H., Ding, S., Ashour, A., Zheng, Q., Han, B. (2024). "Revolutionizing Infrastructure: The Evolving Landscape of Electricity-Based Multifunctional Concrete from Concept to Practice." *Progress in Materials Science.* 145:101310. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2024.101310>.

- Rahman, Md L., Malakooti, A., Ceylan, H., Kim, S., Taylor, P. C. (2022). “*A Review of Electrically Conductive Concrete Heated Pavement System Technology: From the Laboratory to the Full-Scale Implementation.*” Construction and Building Materials. 329:127139. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127139>.
- Shama Rao, N., Simha, T. G. A., Rao, K. P., Ravi Kumar, G. V. V. (2018). *Carbon Composites are Becoming Competitive and Cost Effective*. Infosys.
- Sassani, A., Arabzadeh, A., Ceylan, H., Kim, S., Sajed Sadati, S. M., Gopalakrishnan, K., Taylor, P. C., Abdulla, H. (2018). “*Carbon Fiber-Based Electrically Conductive Concrete for Salt-Free Deicing of Pavements.*” Journal of Cleaner Production. 203:799–809. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.08.315>.
- Rocha Segundo, I., Freitas, E., Castelo Branco, V. T. F., Landi Jr., S., Costa, M. F., Carneiro, J. O. (2021). “*Review and Analysis of Advances in Functionalized, Smart, and Multifunctional Asphalt Mixtures.*” Renewable and Sustainable Energy Reviews. 151:111552. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111552>.
- Shi, Z.-Q., Chung, D. D. L. (1999). “*Carbon Fiber-Reinforced Concrete for Traffic Monitoring and Weighing in Motion.*” Cement and Concrete Research. 29(3):435–39. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00204-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00204-X)
- Song, F., Li, Q., Xu, S. (2024). “*A Review of Self-Sensing Ultra-High Performance Concrete: Towards next-Generation Smart Structural Materials.*” Cement and Concrete Composites. 145:105350. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105350>.
- Sousa, I., D’Alessandro, A., Mesquita, E., Laflamme, S., Ubertini, F. (2024). “*Comprehensive Review of 3D Printed Cementitious Composites with Carbon Inclusions: Current Status and Perspective for Self-Sensing Capabilities.*” Journal of Building Engineering. 98:111192. <https://doi.org/10.1016/J.JBEE.2024.111192>.
- Tritthart, J. 1998. “*Electrochemical Chloride Removal: An Overview and Scientific Aspects.*” The American Ceramic Society. 401–41.
- Tuan, C., Yehia, S. (2004). “*Implementation of Conductive Concrete Overlay for Bridge Deck Deicing at Roca, Nebraska.*” in Civil Engineering Faculty Proceedings & Presentations. 3.
- Vennesland, Ø., Opsahl, O. A. (1989). “*Patent. Removal of Chlorides from Concrete.*”
- Vilaplana, J. L., Baeza, F. J., Galao, O., Alcocel, E. G., Zornoza, E., Garcés, P. (2016). “*Mechanical Properties of Alkali Activated Blast Furnace Slag Pastes Reinforced with Carbon Fibers.*” Construction and Building Materials. 116:63–71. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.066>.
- Yehia, S., Tuan, C. Y. (1999). “*Conductive Concrete Overlay for Bridge Deck Deicing.*” ACI Materials Journal. 96(3):382–90.
- Zornoza, E., Catalá, G., Jiménez, F., Andión, L. G^a, Garcés, P. (2010). “*Electromagnetic Interference Shielding with Portland Cement Paste Containing Carbon Materials and Processed Fly Ash.*” Materiales de Construcción. 60(300):21–32. <https://doi.org/10.3989/mc.2010.51009>.