

# Diseño de mezclas bituminosas auto-sensorizadas

**Freddy Richard Apaza Apaza**

fr.aapaza@upm.es

**Federico Gulisano**

federico.gulisano@upm.es

**Damaris Cubilla**

damaris.cubilla@alumnos.upm.es

**Rafael Jurado-Piña**

rafael.jurado@upm.es

**Gustavo Boada-Parra**

gustavo.boada@upm.es

**Juan Gallego**

juan.gallego@upm.es

El monitoreo en tiempo real de las infraestructuras viales juega un papel fundamental en la digitalización del sector. El desarrollo de materiales auto-sensorizados capaces de generar datos sobre su propio estado estructural representa una solución innovadora para asistir a los gestores de carreteras en el proceso de toma de decisiones e implementar estrategias de mantenimiento predictivo. Sin embargo, el diseño de mezclas bituminosas auto-sensorizadas supone un desafío, ya que implica el uso de aditivos y ensayos de laboratorio no convencionales. El objetivo del presente trabajo es diseñar mezclas bituminosas con capacidades de auto-sensorización. Se incorporaron fibras de carbono en una mezcla bituminosa convencional, dotándola de propiedades de auto-sensorización basadas en los cambios en la resistencia eléctrica de la mezcla cuando está sometida a estímulos externos. Se llevaron a cabo diferentes ensayos mecánicos y electromecánicos para dosificar la mezcla y evaluar la posibilidad de utilizar este material como un sensor intrínseco de deformación y deterioro.

**Palabras Clave:** Auto-sensorización, mezcla bituminosa, monitoreo estructural, digitalización.

Real-time monitoring of road infrastructures plays a fundamental role in the digitalization of the sector. The development of self-sensing materials capable of generating data about their own structural state represents an innovative solution to assist road managers in the decision-making process and implement predictive maintenance strategies. However, designing self-sensing bituminous mixtures is challenging, as it involves the use of unconventional additives and laboratory tests. The objective of this work is to design bituminous mixtures with self-sensing capabilities. Carbon fibers were incorporated into a conventional bituminous mixture, endowing it with self-sensing properties based on changes in the electrical resistance of the mixture when subjected to external stimuli. Various mechanical and electromechanical tests were conducted to formulate the mixture and evaluate the feasibility of using this material as an intrinsic sensor of deformation and deterioration.

**Keywords:** Auto-sensing, bituminous mixture, structural monitoring, digitalization.

## 1. INTRODUCCIÓN

La digitalización de las infraestructuras viales es un desafío urgente para la transición hacia una movilidad segura, sostenible e inteligente. Se considera una herramienta esencial para la descarbonización del sector y para abordar las nuevas necesidades emergentes asociadas con vehículos conectados y automatizados.

Uno de los principales desafíos de la transformación digital es gestionar la enorme cantidad de datos generados por la infraestructura vial, desde su recopilación hasta la toma de decisiones. Por lo tanto, construir un ecosistema efectivo de gestión de datos es esencial para desarrollar sistemas inteligentes de monitoreo de carreteras.

El uso de sensores ubicados dentro de la infraestruc-

tura vial y en sus alrededores permite la recopilación automática de diversos datos útiles para el monitoreo del estado estructural de los firmes asfálticos [1].

Entre las diferentes tecnologías, el concepto de auto-sensorización tiene varias ventajas frente a la utilización de sensores embebidos, sobre todo debido a la compatibilidad con los materiales asfálticos y la durabilidad [2]. La auto-sensorización se refiere a la capacidad de un material para detectar de manera automática su propio estado estructural, sin la necesidad de sensores embebidos [3]. Estos materiales se diseñan incorporando una cierta cantidad de aditivos con capacidad de conductividad eléctrica, de tal manera que formen una extensa red conductora dentro del material estructural y le proporcionen funciones de autodetección, basadas en los cambios en la resistencia eléctrica de la mezcla cuando está sometida a estímulos externos [4]. Varios estudios recientes han demostrado que la incorporación de diferentes aditivos puede dotar a la mezcla bituminosa de capacidad de auto-sensorización.

Gulisano et al. [5,6] incorporaron nanoplaquetas de grafeno en la mezcla bituminosa, encontrando una relación lineal entre el estado de tensión del material y su propia resistencia eléctrica. Otros investigadores han estudiado las propiedades de auto-sensorización de mezclas bituminosas con fibras de carbono [7], demostrando su aplicabilidad para tareas de pesaje dinámico [8–10] y monitoreo estructural [11].

Sin embargo, uno de los aspectos más importantes al utilizar esta tecnología es la correcta dosificación de los aditivos conductores, de manera que no afecten las características mecánicas de la mezcla y al mismo tiempo garanticen buenas propiedades de sensorización. La investigación sobre este tema es muy limitada. Además, las modalidades de carga utilizadas normalmente en los laboratorios durante los ensayos de auto-sensorización no simulan muy bien las condiciones reales a las que estaría sometido el material en servicio, y por esto se necesitan más estudios evaluando las propiedades de auto-sensorización con ensayos dinámicos.

Por lo tanto, el principal objetivo de este trabajo es diseñar una mezcla asfáltica auto-sensorizada. Para lograrlo, se incorporaron fibras de carbono en diferentes proporciones, y se llevó a cabo una dosificación de estas

mezclas siguiendo criterios técnicos, que consideran propiedades mecánicas, eléctricas, y criterios económicos. Posteriormente, se realizaron diversos ensayos electromecánicos para evaluar las capacidades de auto-detección de deformación y del estado estructural de estos materiales auto-sensorizados.

## 2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

### 2.1 Materiales

En el trabajo se empleó una mezcla bituminosa tipo SMA8. La granulometría de la mezcla, comprendida dentro del huso fijado en el Art. 544 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), se indica en la Tabla 1. "

Tabla 1. Granulometría de la mezcla bituminosa SMA8

Tamiz (mm)	% Pasa
11.2	100
8	95
4	37.5
2	30
0.5	17
0.063 (filler)	8

El árido utilizado ha sido un pórfido, con un peso específico de 2.80 g/cm<sup>3</sup> y un coeficiente de Los Ángeles de 15.

Se utilizó un betún modificado con polímero tipo PMB 45/80-65, y sus propiedades se indican en la Tabla 2.

Para reducir la resistencia eléctrica de las mezclas bituminosas, se utilizaron fibras de carbono (FC) con una longitud de 3 mm y un diámetro de 7 μm, que tienen el aspecto que se muestra en la Figura 1.

En función del contenido de fibras de carbono (FC), en porcentaje sobre el peso de los áridos, se han fabricado 6 tipologías de mezclas bituminosas: Referencia (sin FC), FC-0.1%, FC-0.2%, FC-0.3%, FC-0.4% y FC-0.5%.

Tabla 2. Propiedades del betún PMB 45/80-65

Propiedad	Norma	Requisito PG3	Resultado
Penetración a 25 °C	UNE - EN 1426	45-80 (0.1 mm)	50.0
Punto de reblandecimiento	UNE - EN 1427	> 65 °C	71.2
Cohesión. Fuerza-ductilidad a 5 °C	UNE - EN 13589	> 3 J/cm <sup>2</sup>	5.9
Recuperación elástica a 25 °C	UNE - EN 13398	> 70 %	85



Figura 1. Fibras de carbono

## 2.2 Propiedades mecánicas y eléctricas

El efecto de la adición de fibras de carbono en las prestaciones mecánicas de las mezclas bituminosas se evaluó mediante los ensayos de resistencia a tracción indirecta ITS a 15 °C (UNE-EN 12697-23) y módulo de rigidez ITSM a 20 °C (UNE-12697-26). Se utilizaron dos muestras para cada tipo de mezcla bituminosa durante esta fase.

El procedimiento de mezclado y compactación utilizado en esta etapa se detalla a continuación. En primer lugar, los áridos y el betún se precalentaron en una estufa a una temperatura de 170°C durante 2 horas. Luego, los áridos gruesos y finos se mezclaron con la cantidad seleccionada de fibras de carbono durante 1 minuto a la misma temperatura. A continuación, se incorporó el betún y se mezcló durante 1 minuto. Finalmente, se añadió el filler, y todos los componentes se mezclaron durante 1 minuto.

La compactación de la mezcla se realizó utilizando un compactador por impacto Marshall [UNE 12697-30],

aplicando 50 golpes por cara.

Para evaluar la resistencia eléctrica de las mezclas bituminosas con fibras de carbono se fabricaron dos muestras adicionales para cada tipo de mezcla bituminosa. La medición de la resistencia eléctrica requiere la incorporación de cuatro cables de cobre (electrodos) embebidos dentro de las muestras de mezcla bituminosa, lo cual implica una modificación del procedimiento de fabricación descrito anteriormente (Figura 2). Para ello, se perforaron cuatro pequeños agujeros en la base metálica del molde Marshall con una separación entre ellos de 20 mm, para acomodar los cuatro cables de cobre (electrodos) en posición vertical, cada uno con una longitud de 4 cm y un diámetro de 2 mm (Figura 2a). Los electrodos se fijaron de forma segura con un soporte metálico para evitar movimientos durante la fase de vertido (Figura 2b). Después de haber introducido una parte de la mezcla en el molde (Figura 2c), se retiró el soporte metálico y se añadió el resto de la mezcla. Finalmente, se llevó a cabo la fase de compactación. Después de desmoldar la muestra, los cuatro electrodos se soldaron a otros cables de cobre más flexibles, para permitir la medición eléctrica (Figura 2d).

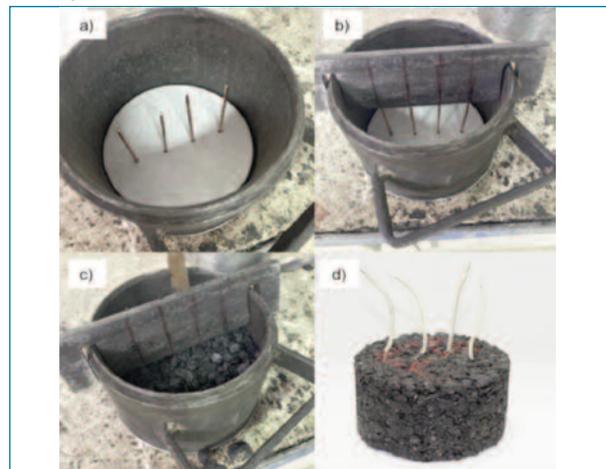


Figura 2. Fabricación de las mezclas para la medición eléctrica

## Diseño de mezclas bituminosas auto-sensorizadas

La medición de la resistencia eléctrica de las mezclas bituminosas se llevó a cabo utilizando un multímetro digital Keysight 34465A y el método de sonda de cuatro puntos. Este método tiene una configuración de cuatro electrodos, que están ubicados en línea recta y separados a igual distancia entre ellos. El multímetro aplica una corriente continua (I) entre los electrodos externos, y se mide la caída de voltaje (V) entre los dos electrodos internos. La resistencia eléctrica (R) de la muestra se calcula dividiendo la caída de voltaje (V) por la corriente continua aplicada (I). Las mediciones de la resistencia eléctrica de las muestras se han realizado dentro de una cámara ambiental para controlar la temperatura, y se ha repetido la medición a tres diferentes temperaturas, 10 °C, 25 °C y 40 °C. La medición se realizó por un tiempo total de 1 minuto, y se tomó el valor promedio a largo de la medición como valor de la resistencia eléctrica.

### 2.3 Ensayos electromecánicos de auto-sensorización

Los ensayos electromecánicos de auto-sensorización consisten en la evaluación de los cambios en la resistencia eléctrica de las mezclas bituminosas como resultado de la aplicación de un estímulo externo. En esta sección se describen dos ensayos electromecánicos que se utilizaron para evaluar las propiedades de auto-sensorización de las mezclas bituminosas con fibras de carbono. Estos ensayos se llevaron a cabo exclusivamente para la mezcla con un 0.3% de fibras de carbono (FC-0.3%), que resultó ser la más adecuada desde el punto de vista técnico y económico, como se detalla a continuación en la sección 3.1.

El primer ensayo electromecánico se realizó para evaluar las propiedades de piezorresistividad de las mezclas, es decir, la capacidad de cambiar su propia resistencia eléctrica en función de una deformación aplicada. La configuración del ensayo se muestra en la Figura 3. La muestra se sometió a cuatro cargas dinámicas de tracción indirecta tipo haversine a 20 °C, con amplitud creciente de 500 N, 1000 N, 1500 N y 2000 N. Entre cada ciclo de carga, se aplicó un tiempo de reposo de 10 s. Para evaluar el efecto de la frecuencia de aplicación de la carga, se repitieron los ensayos a diferentes frecuencias: 1 Hz, 5 Hz y 10 Hz, es decir, duraciones de la car-

ga de 1 s, 0.2 s y 0.1 s.

Se utilizaron dos transductores de desplazamiento lineal variable (LVDT) para medir las microdeformaciones unitarias transversales de la muestra durante el ensayo, con una frecuencia de muestreo de 100 Hz. Además, se midió la resistencia eléctrica a lo largo del ensayo con la misma frecuencia de muestreo (100 Hz) utilizando el multímetro digital y la metodología detallada en la sección 2.2.



Figura 3. Ensayo de auto-detección de deformación

Una vez recopilados los datos, es necesario realizar un procesamiento digital de las señales para poder evaluar la relación entre las microdeformaciones unitarias ( $\mu\epsilon$ ) que ocurren al aplicar la carga y los cambios en la resistencia eléctrica (FCR) de la muestra debido al efecto piezorresistivo.

Para evaluar las propiedades piezorresistivas, comúnmente se emplea el concepto de cambio fraccional en la resistencia eléctrica (FCR), en %, determinado en función de las variaciones de la resistencia eléctrica con respecto a su valor inicial al principio del ensayo ( $R_0$ ):

$$FCR(\%) = \frac{R - R_0}{R_0} \cdot 100$$

Donde R es el valor variable de la resistencia eléctrica a lo largo del ensayo. Como resultado de la carga externa aplicada, tanto la señal de microdeformación ( $\mu\epsilon$ ) como la señal de FCR mostraron cuatro fluctuaciones visibles distintas. Se identificaron las amplitudes de estas fluctuaciones,  $\Delta\mu\epsilon$  y  $\Delta FCR$ , y se llevó a cabo un análisis

de regresión lineal para establecer la relación entre las amplitudes de la microdeformación y del FCR, evaluando de esta manera las capacidades de detección de deformación de la mezcla bituminosa con fibras de carbono.

El segundo ensayo electromecánico consistió en evaluar la capacidad de la mezcla bituminosa con fibra de carbono para detectar su propio estado de deterioro. Para ello, se comparó la respuesta eléctrica de la mezcla en su estado inicial con la respuesta eléctrica de la misma muestra deteriorada.

En esta fase, se fabricaron muestras con dimensiones de 41-26-5 cm<sup>3</sup>, compactadas con un compactador de placa (EN 12697-33). La muestra se vertió en el molde en dos capas diferentes, lo que permitió colocar una plantilla de madera con cuatro cables de cobre, dispuestos simétricamente respecto al centro de la muestra a una distancia de 4 cm entre cables, y a una altura de 1 cm sobre el fondo de la muestra. A partir de la muestra, se obtuvieron diferentes muestras prismáticas (vigas) con dimensiones de 41-55 cm<sup>3</sup> con los cuatro cables embebidos.

La evaluación electromecánica constó de tres ensayos distintos, donde la muestra se sometió a flexión en cuatro puntos, como se observa en la Figura 4. En el primer ensayo, la muestra se sometió a 100 ciclos de carga dinámica senoidal con una amplitud de 250 N y una frecuencia de aplicación de la carga de 10 Hz, lo que resultó en una duración de 10 segundos para el ensayo. Durante el ensayo, se midió la resistencia eléctrica con una frecuencia de muestreo de 100 Hz para evaluar la respuesta eléctrica de la mezcla en su estado inicial. En el segundo ensayo, la muestra fue sometida a deterioro por fatiga mediante la aplicación de 100,000 ciclos de carga con control de deformación (100  $\mu\epsilon$ ) a una frecuencia de 10 Hz. Durante esta fase, se observó una reducción del módulo de rigidez de la mezcla desde 13,449 MPa hasta 7,746 MPa. En el tercer ensayo, se repitió el procedimiento utilizado en el primero, es decir, 100 ciclos de carga dinámica senoidal con una amplitud de 250 N y una frecuencia de aplicación de la carga de 10 Hz, con evaluación de la resistencia eléctrica con frecuencia de muestreo de 100 Hz, para evaluar la respuesta eléctrica de la muestra deteriorada tras el ensayo de

fatiga.

Por lo tanto, la capacidad de autodetección del deterioro de la mezcla se realizó comparando la amplitud de los cambios de FCR registrada en los 100 ciclos de carga anteriores al ensayo de fatiga, y en los 100 ciclos de carga en la misma muestra, tras su agotamiento a fatiga.



Figura 4. Ensayo de auto-detección del deterioro

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Efecto de las fibras de carbono en las propiedades mecánicas y eléctricas

El efecto de la adición de fibras de carbono en la resistencia a tracción indirecta (ITS) y en el módulo de rigidez (ITSM) se muestra en las Figuras 5 y 6. En comparación con la mezcla bituminosa de referencia (sin fibras de carbono), que tuvo un ITS promedio de 1.412 MPa, la incorporación de fibras de carbono tiende, en general, a aumentar el ITS. Aunque el aumento no parece seguir una tendencia lineal, posiblemente debido al tamaño limitado de la muestra, se observó que un incremento del contenido de fibra hasta el 0.5% sobre el peso de los áridos aumenta el ITS hasta 1.753 MPa (un 24% más en comparación con la mezcla de referencia).

Este resultado es coherente con otros estudios de la literatura [12,13] y se atribuye probablemente a que, durante la aplicación de la carga, las fibras generan un efecto puente entre las caras de las grietas, constituyendo un refuerzo que incrementa la resistencia a tracción indirecta.

ta.

La fibra de carbono también tiende a aumentar el módulo de rigidez de la mezcla bituminosa, pasando de un valor de 2144 MPa en la mezcla de referencia a 2805 MPa en la mezcla con un 0.5% de fibras. Las fibras de carbono utilizadas en el estudio presentaban un módulo de rigidez a tracción de 240 GPa, lo que inevitablemente confiere rigidez a la mezcla bituminosa. En resumen, parece que la adición de fibras de carbono tiene un impacto significativo en las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica.

Es importante tener en cuenta que el principal objetivo de agregar estas fibras es conferir a la mezcla asfáltica propiedades de auto-sensorización, es decir, permitir que el pavimento detecte por sí mismo su propio estado estructural en términos de deformaciones y detección de deterioro. Por un lado, se debe considerar que actualmente el costo de las fibras de carbono es elevado (aproximadamente 30 €/kg), lo que hace que su uso para pavimentar una infraestructura completa no sea económicamente viable. En cambio, este aditivo podría ser adecuado para la construcción de secciones específicas de pavimento auto-sensorizado, que proporcionen datos útiles sobre el estado de la vía. Sin embargo, si las características mecánicas de la mezcla bituminosa de referencia y la mezcla con fibras son diferentes, los datos generados pueden no reflejar con precisión el estado real de la vía. Es importante destacar que la aplicación de esta tecnología aún está en una etapa inicial y se requieren más estudios, especialmente para analizar las relaciones entre las propiedades mecánicas de mezclas convencionales y con fibras. Esto permitiría obtener factores de corrección entre mezclas y obtener datos más fiables, utilizando estos materiales de manera más eficiente.

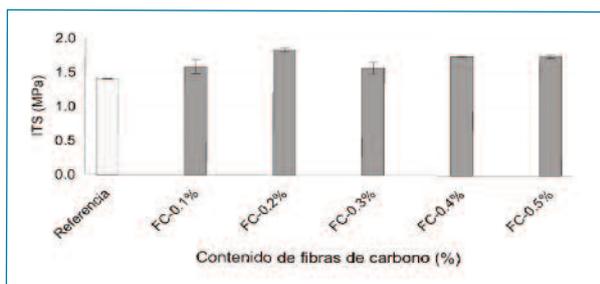


Figura 5. Resistencia a tracción indirecta ITS de las mezclas con fibras de carbono

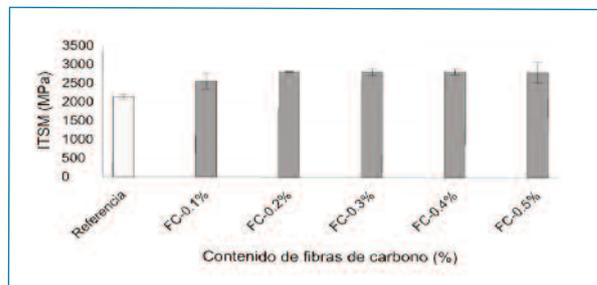


Figura 6. Módulo de rigidez ITSM de las mezclas con fibras de carbono

La relación entre la resistencia eléctrica de las mezclas bituminosas y el contenido de fibras de carbono a diferentes temperaturas se muestra en la Figura 7. A medida que aumenta el contenido de fibras de carbono, se generan más contactos eléctricos, lo que se traduce en una reducción en la resistencia eléctrica de las mezclas bituminosas. Lo que resulta interesante es la forma de las curvas, que demuestra la existencia de un contenido crítico de fibras, conocido en la literatura como umbral de percolación [14], caracterizado por una disminución repentina de la resistencia eléctrica. En el presente trabajo, parece que el umbral de percolación se sitúa entre el 0.1% y el 0.3% de fibras de carbono, donde la resistencia eléctrica de la mezcla disminuye abruptamente de 317198  $\Omega$  a 15  $\Omega$  a una temperatura de 25  $^{\circ}\text{C}$ . A partir de este contenido, la resistencia eléctrica sigue disminuyendo, aunque con menor intensidad. Por lo tanto, un aumento del contenido de fibras podría no justificar el aporte en términos de reducción de la resistencia eléctrica, especialmente desde el punto de vista económico. En resumen, parece que el contenido óptimo de fibras de carbono, tanto desde el punto de vista técnico como económico, se encuentra en el entorno del 0.3%.

Otro aspecto importante es el efecto de la temperatura en la resistencia eléctrica de las mezclas bituminosas. El aumento de la temperatura de 10  $^{\circ}\text{C}$  a 25  $^{\circ}\text{C}$  tiende a disminuir la resistencia eléctrica de todas las muestras. Este fenómeno se conoce como efecto termorresistivo, debido principalmente al hecho de que un aumento de temperatura produce una disminución en la distancia entre partículas conductoras debido a las fluctuaciones térmicas, lo que resulta en un aumento en la movilidad de los electrones y una reducción de la resistencia eléctrica [15]. Sin embargo, no se observan dife-

rencias significativas entre los resultados de resistencia eléctrica a 25 °C y a 40 °C. El estudio de la relación entre las propiedades eléctricas y la temperatura resulta fundamental para aplicaciones de auto-sensorización. Por un lado, esta propiedad podría utilizarse para detectar cambios de temperatura en el pavimento. Por otro lado, el efecto de la temperatura podría generar un factor de confusión a tener en cuenta durante mediciones de deformación o daño y el posterior tratamiento de los datos.

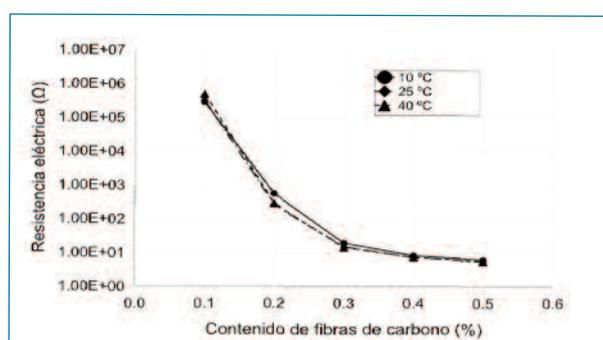


Figura 7. Efecto del contenido de fibras de carbono en la resistencia eléctrica de las mezclas bituminosas

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la caracterización mecánica y eléctrica de las mezclas bituminosas, parece que la inclusión de fibras de carbono en un contenido del 0.3% sobre el peso de los áridos podría ser una solución óptima. Por un lado, esto permitiría reducir la disparidad entre las propiedades mecánicas con respecto a la mezcla de referencia, lo cual es crucial para aplicaciones de auto-sensorización. Por otro lado, este contenido se sitúa justo después del umbral de percolación, indicando que un aumento en el contenido de fibras no resultaría en mejoras significativas en las propiedades eléctricas. Por esta razón, se ha decidido seleccionar este contenido para la siguiente fase del estudio, que se centra en la evaluación de las propiedades de auto-sensorización.

### 3.2 Capacidad de auto-detección de deformación

Los resultados del primer ensayo electromecánico, que se refiere a la auto-detección de la deformación (piezoresistividad) de la mezcla FC-0.3%, se presentan en la

Figura 8 para las tres frecuencias diferentes de aplicación de la carga, 1 Hz, 5 Hz y 10 Hz. Se puede observar que, debido al efecto piezorresistivo de la mezcla con fibras de carbono, la imposición de deformaciones en el material produce cambios en las propiedades eléctricas. Al deformarse en dirección transversal, las fibras se separan entre sí y se produce un aumento de la resistencia eléctrica. En la fase de descarga, las fibras vuelven a juntarse, reduciendo la resistencia eléctrica de la muestra.

Los mejores resultados se obtuvieron para una frecuencia de aplicación de carga de 1 Hz (Figura 8a), donde las dos señales siguen claramente la misma tendencia. Después de cada ciclo de carga, debido a las propiedades viscoelásticas de la mezcla, la deformación no se recupera instantáneamente. El FCR parece seguir la misma tendencia, probablemente porque en la fase de descarga también los contactos eléctricos tardan cierto tiempo en volver a su condición inicial. Este fenómeno permite que estos materiales puedan auto-detectar también acumulación de deformaciones plásticas, simplemente midiendo su propia resistencia eléctrica.

Aumentando la frecuencia de aplicación de la carga a 5 Hz y 10 Hz (Figura 8b y c), se puede observar que la deformación produce igualmente cambios en la resistencia eléctrica de la muestra, mostrando buenas capacidades piezorresistivas. En la fase de descarga y de reposo, sin embargo, la resistencia eléctrica llega a valores inferiores respecto a su valor inicial. Por ello, se observa un FCR negativo, lo que parece significar un acercamiento de las fibras, quizás debido a la velocidad elevada de la aplicación de la carga que cambia notablemente la distribución de la red conductora formada por las fibras de carbono.

Los resultados del análisis de regresión lineal se presentan en la Figura 9, permitiendo determinar de manera cuantitativa la capacidad de auto-detección de deformación de la mezcla FC-0.3%. Se observa que, para todas las frecuencias analizadas, los coeficientes de determinación  $R^2$  son muy altos, confirmando un buen ajuste lineal. En términos prácticos, esto significa que, simplemente midiendo los cambios en la resistencia eléctrica de la mezcla, es posible predecir el nivel de deformación al que se ha sometido. La obtención de estos datos en tiempo real es muy útil, ya que permitiría obtener un his-

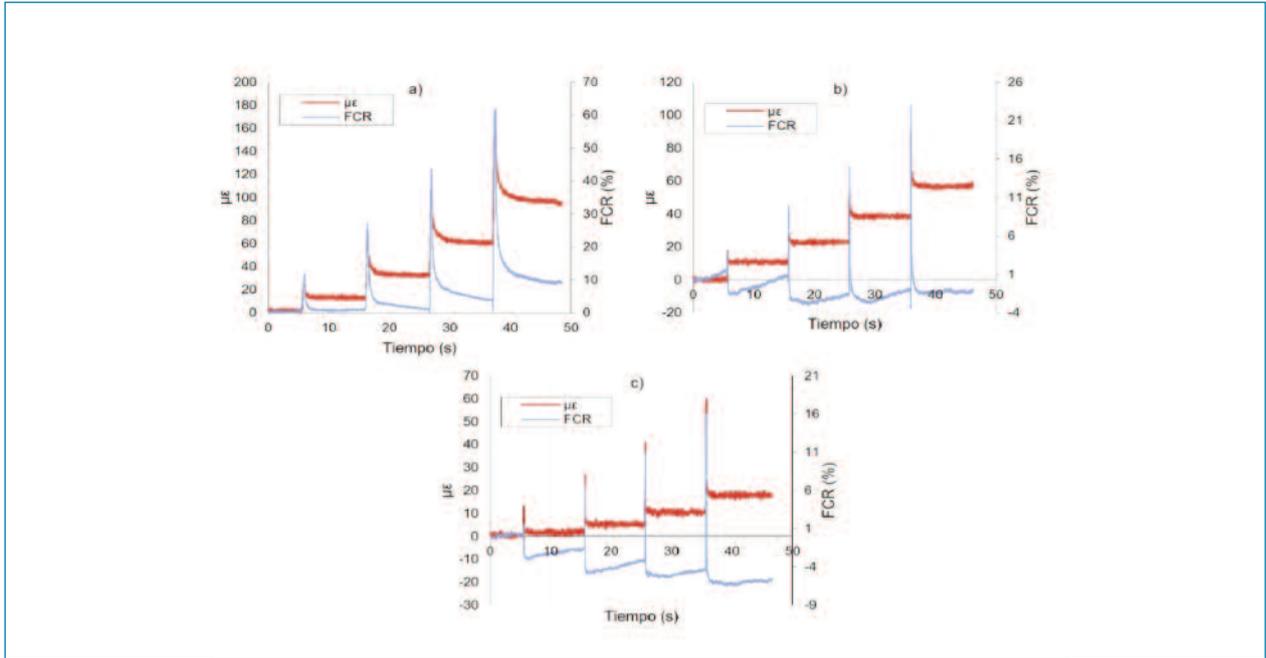


Figura 8. Capacidad de auto-detección de deformación de la mezcla bituminosa FC-0.3%. a) 1 Hz, b) 5 Hz, c) 10 Hz.

torial de las deformaciones y desarrollar modelos de predicción de la vida útil del pavimento.

Es importante señalar también un cierto efecto de la frecuencia de aplicación de la carga en la relación entre deformación y FCR. En particular, a igualdad de deformación aplicada, los cambios de FCR en los casos de 5 Hz y 10 Hz son menores en comparación con el caso a 1 Hz. Parece que la aplicación de una carga muy rápida de alguna manera dificulta las perturbaciones en la red conductora dentro del material. Sin embargo, se requerirán estudios adicionales sobre el tema para aclarar este fenómeno.

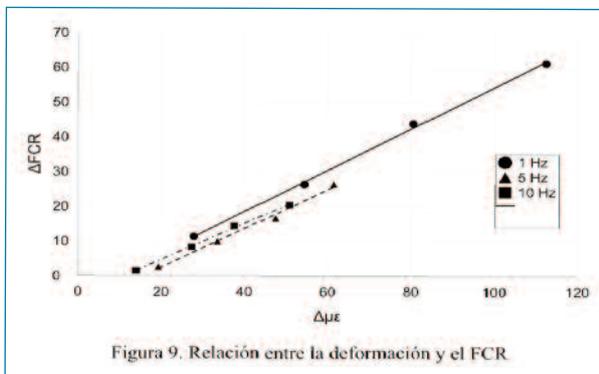


Figura 9. Relación entre la deformación y el FCR

### 3.3 Capacidad de auto-detección del estado estructural

Los resultados del ensayo de auto-detección del estado estructural se presentan en la Figura 10. Las Figuras 10a y b muestran la respuesta eléctrica de la muestra en su estado inicial y después de deteriorarse a fatiga. En la Figura 10c, se realiza una comparación cuantitativa mediante diagramas de cajas y bigotes de la amplitud de los cambios de FCR por cada ciclo de carga en los dos estados diferentes. Como se puede observar, en el estado inicial, cuando la muestra tenía un módulo de rigidez de 13,449 MPa, los cambios de FCR varían aproximadamente entre el 8% y el 22%. Además, se pueden apreciar diferentes valores atípicos en la parte superior del gráfico, que probablemente se deban a una fase de acomodación de la muestra durante los primeros segundos del ensayo.

Después de someterse al ensayo de fatiga, la muestra tenía un módulo de rigidez de 7,746 MPa. En estas condiciones, se observa claramente un aumento en los cambios de FCR por cada ciclo de carga, distribuyéndose aproximadamente entre el 10% y el 36%. La muestra, teniendo un módulo menor, se deforma más al aplicar el mismo nivel de carga, y debido al efecto piezorresisti-

vo esto se traduce en un aumento de los cambios de FCR. Además, en este caso no se registraron datos atípicos.

Los resultados del ensayo sugieren que el estado de deterioro de la mezcla tiene un efecto en la respuesta eléctrica de la mezcla bituminosa con fibras de carbono. Esta relación podría emplearse para el monitoreo en tiempo real del estado estructural del firme, ya que un seguimiento periódico de la respuesta eléctrica puede proporcionar información valiosa sobre el estado de deterioro del material.

sas.

- A medida que aumenta el contenido de fibras de carbono, se observa una reducción en la resistencia eléctrica de las mezclas bituminosas.
- Considerando criterios técnicos (propiedades mecánicas y eléctricas) y criterios económicos, se determinó un contenido óptimo de fibras de carbono del 0.3% sobre el peso de los áridos.
- La mezcla con fibras de carbono exhibe buenas propiedades de auto-detección de deformación (piezorresistividad). Al aplicar deformación, se ob-

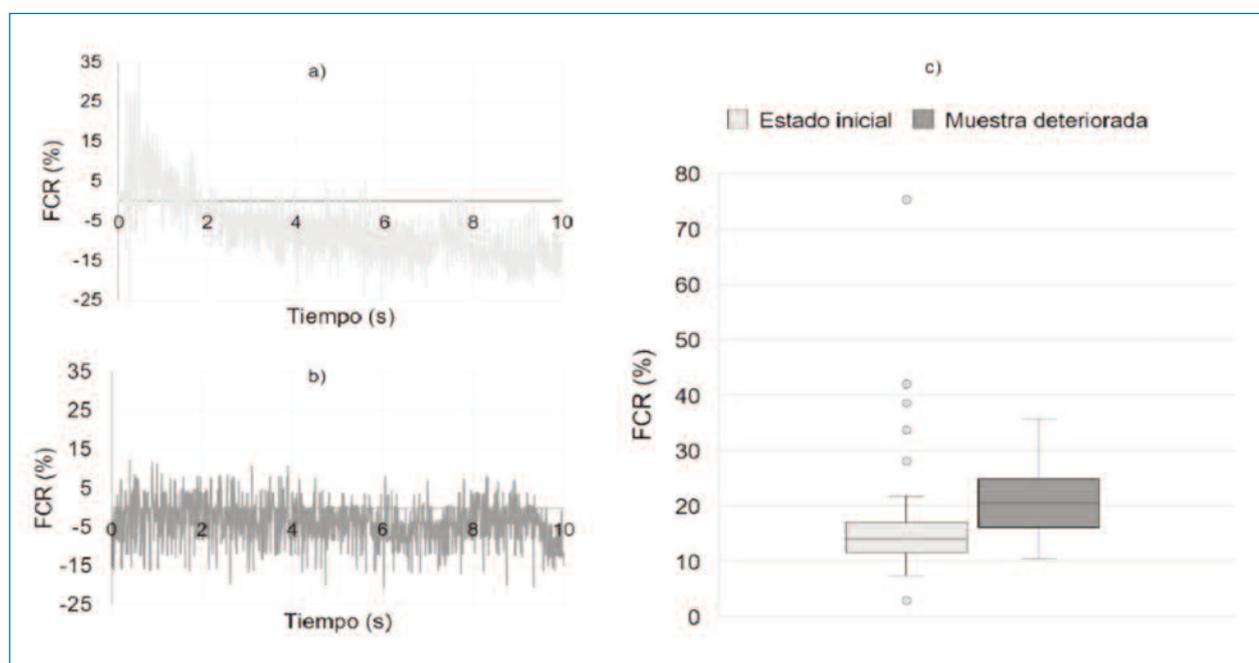


Figura 10. Capacidad de auto-detección del deterioro de la mezcla bituminosa FC-0.3%

#### 4. CONCLUSIONES

En resumen, el objetivo principal de este trabajo ha sido el diseño de una mezcla bituminosa con capacidades de auto-sensorización. Se llevó a cabo una caracterización mecánica y eléctrica para dosificar la mezcla bituminosa con fibras de carbono, y se realizaron diversos ensayos electromecánicos para evaluar las prestaciones de auto-sensorización. Los resultados clave obtenidos son los siguientes:

- La incorporación de fibras de carbono tiende a aumentar la resistencia a tracción indirecta (ITS) y el módulo de rigidez (ITSM) de las mezclas bitumino-

servan cambios en la resistencia eléctrica del material con una tendencia lineal.

- La respuesta eléctrica de la mezcla con fibra de carbono varía con el nivel de deterioro de la muestra, lo que confiere capacidades de auto-detección del deterioro.

Los pavimentos de carreteras auto-sensorizados representan una tecnología innovadora para la recopilación en tiempo real de datos sobre el estado estructural. Sin embargo, se requieren estudios adicionales de laboratorio y proyectos a escala real antes de su implementación generalizada. Investigaciones más avanzadas sobre la relación entre las prestaciones mecánicas de estos ma-

teriales en comparación con mezclas bituminosas convencionales, la aplicación de técnicas de medición eléctricas de bajo costo y procesamiento de señales, y la evaluación del impacto de factores externos como la temperatura y la humedad, son temas claves para futuras líneas de investigación.

### 5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España en el marco de los proyectos "Sensing-PAVE: Pavimentos asfálticos auto-sensorizados" PID2020-118987RB-I00 y "Digital-PAVE: Durabilidad de la respuesta piezorresistiva de pavimentos asfálticos autosensorizados" TED2021-131474B-I00.

### 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Manosalvas-Paredes, K. Aono, S. Chakrabartty, J. Blanc, D. Lo Presti, K. Chatti, N. Lajnef, Validation of a Novel Sensing Approach for Continuous Pavement Monitoring Using Full-Scale APT Testing, *J. Transp. Eng. Part B Pavements* 149 (2023) 04022062. <https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000397>.
- [2] H.B. Birgin, A. D'Alessandro, A. Corradini, S. Laflamme, F. Ubertini, Self-sensing asphalt composite with carbon microfibers for smart weigh-in-motion, *Mater. Struct.* 55 (2022) 138. <https://doi.org/10.1617/s11527-022-01978-w>.
- [3] B. Han, S. Ding, X. Yu, Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review, *Measurement* 59 (2015) 110–128. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.048>.
- [4] F. Gulisano, T. Buasiri, A. Cwirzen, J. Gallego, Monitoring Road Infrastructures with Self-sensing Asphalt Pavements, in: P. Rizzo, A. Milazzo (Eds.), *Eur. Workshop Struct. Health Monit.*, Springer International Publishing, Cham, 2023: pp. 784–793. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-07254-3\\_79](https://doi.org/10.1007/978-3-031-07254-3_79).
- [5] F. Gulisano, T. Buasiri, F.R.A. Apaza, A. Cwirzen, J. Gallego, Piezoresistive behavior of electric arc furnace slag and graphene nanoplatelets asphalt mixtures for self-sensing pavements, *Autom. Constr.* 142 (2022) 104534. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104534>.
- [6] F. Gulisano, M. Abedi, R. Jurado-Piña, F.R.A. Apaza, M.J. Roshan, R. Fangueiro, A.G. Correia, J. Gallego, Stress and damage-sensing capabilities of asphalt mixtures incorporating graphene nanoplatelets, *Sens. Actuators Phys.* 359 (2023) 114494. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114494>.
- [7] H.R. Rizvi, M.J. Khattak, M. Madani, A. Khattab, Piezoresistive response of conductive Hot Mix Asphalt mixtures modified with carbon nanofibers, *Constr. Build. Mater.* 106 (2016) 618–631. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.187>.
- [8] H.B. Birgin, A. D'Alessandro, M. Favaro, C. Sangiorgi, S. Laflamme, F. Ubertini, Field investigation of novel self-sensing asphalt pavement for weigh-in-motion sensing, *Smart Mater. Struct.* 31 (2022) 085004. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac7922>.
- [9] H.B. Birgin, E. García-Macías, A. D'Alessandro, F. Ubertini, Self-powered weigh-in-motion system combining vibration energy harvesting and self-sensing composite pavements, *Constr. Build. Mater.* 369 (2023) 130538. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130538>.
- [10] F. Gulisano, F.R.A. Apaza, D. Gálvez-Pérez, R. Jurado-Piña, G. Boada-Parra, J. Gallego, Non-destructive testing methods for road pavement health monitoring: electromechanical assessment of self-sensing asphalt materials, in: *Earth Resour. Environ. Remote Sensing GIS Appl. XIV, SPIE*, 2023: pp. 241–250. <https://doi.org/10.1117/12.2680606>.
- [11] S. Ullah, S. Wan, C. Yang, X. Ma, Z. Dong, Self-stress and deformation sensing of electrically conductive asphalt concrete incorporating carbon fiber and iron tailings, *Struct. Control Health Monit.* 29 (2022) e2998. <https://doi.org/10.1002/stc.2998>.
- [12] S. Qian, H. Ma, J. Feng, R. Yang, X. Huang, Fiber reinforcing effect on asphalt binder under low temperature, *Constr. Build. Mater.* 61 (2014)

120–124. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.035>.

- [13] B. Wu, Z. Pei, P. Xiao, K. Lou, X. Wu, Influence of fiber-asphalt interface property on crack resistance of asphalt mixture, *Case Stud. Constr. Mater.* 17 (2022) e01703. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01703>.
- [14] S. Wu, L. Mo, Z. Shui, Z. Chen, Investigation of the conductivity of asphalt concrete containing conductive fillers, *Carbon* 43 (2005) 1358–1363. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.12.033>.
- [15] N. Jović, D. Dudić, A. Montone, M.V. Antisari, M. Mitrić, V. Djoković, Temperature dependence of the electrical conductivity of epoxy/expanded graphite nanosheet composites, *Scr. Mater.* 58 (2008) 846–849. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.12.041>.