

JUAN ANTONIO FERNÁNDEZ DEL CAMPO

**Premio internacional
A LA INNOVACIÓN EN CARRETERAS**

TRABAJO GANADOR- Texto completo

Materiales Asfálticos Mecanomodificables para la Construcción de Carreteras Inteligentes.

Soluciones innovadoras y emergentes para carreteras.

Autores:

Fernando Moreno Navarro. Profesor titular del departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería de la Universidad de Granada (España).

María del Carmen Rubio Gámez. Catedrática del departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería de la Universidad de Granada (España).

Guillermo Iglesias Salto. Profesor titular del departamento de Física Aplicada de la Universidad de Granada (España).

Paulina Leiva Padilla. Investigadora Postdoctoral del Departamento de Materiales y Estructuras de la Universidad Gustave Eiffel (Francia).

Índice de contenido

Lista de Figuras.....	2
Lista de Tablas.....	2
Resumen.....	3
1. Introducción.....	4
2. Objetivo.....	5
3. Materiales y métodos.....	5
3.1. Materiales.....	5
3.2. Métodos.....	6
3. Resultados y discusión.....	14
3.1. Fase 1 - MAMs: Materiales mejorados para carreteras.....	14
3.2. Fase 2 - MAMs: Codificación de carreteras para el guiado de vehículos.....	16
3.3. Fase 3 - MAMs: Nuevas tecnologías para el mantenimiento de carreteras.....	19
3.3.1. Eliminación del hielo/nieve de la superficie de la carretera.....	19
3.3.2. Potenciar las capacidades de “auto-recuperación/curado” de los materiales asfálticos.....	21
4. Conclusiones.....	24
5. Agradecimientos.....	25
6. Referencias.....	26
Anexo: Publicaciones científicas.....	27

Lista de Figuras

Figura 1. Efectos de los campos magnéticos en los materiales asfálticos mecanomutables.	4
Figura 2. Aplicaciones de los materiales asfálticos mecanomutables para pavimentos inteligentes.....	4
Figura 3. Curva granulométrica de la arena caliza de los morteros.	5
Figura 4. Fibras de acero utilizadas en la fabricación de los morteros.....	6
Figura 5. Pilares de investigación del proyecto.....	7
Figura 6. Equipo utilizado en la Fase 1.....	9
Figura 7. Equipo diseñado para la Parte 1 de la Fase 2: Análisis de laboratorio.	10
Figura 8. Equipo diseñado para la Parte 1 de la Fase 2: Prueba de concepto.....	10
Figura 9. Equipo diseñado para la Fase 3 - Parte 1: Eliminar el hielo/nieve de la carretera..	12
Figura 10. Equipo utilizado para la Fase 3, Parte 2: Capacidad de recuperación de los materiales asfálticos.	13
Figura 11. Influencia de temperatura para intensidad del campo = 210 mT.....	15
Figura 12. Influencia de la altura de la probeta en el cambio de módulo cuando se aplica una intensidad de campo de 210 mT.	15
Figura 13. Influencia de la intensidad de campo magnético	16
Figura 14. Influencia de la altura de medición.	17
Figura 15. Influencia de la distancia más cercana a cada sensor, R: sensor rojo, B: sensor azul.....	17
Figura 16. Influencia de la velocidad de aproximación a la $D = 0$	18
Figura 17. Prueba de concepto.	19
Figura 18. Distribución de temperaturas en la cara lateral de la probeta durante el experimento, 7.0 mT de campo magnético y capa superficial de 20 mm.	20
Figura 19. Influencia de la intensidad del campo magnético en la temperatura a los 300 s y 1800 s.....	21
Figura 20. Resultados del módulo promedio para cada experimento del estudio.	22
Figura 21. Curvas de esfuerzo vs ciclo de carga.	23
Figura 22. Resultados de recuperación obtenida para cada experimento del estudio.	24

Lista de Tablas

Tabla 1. Proporción porcentual de los materiales utilizados en la confección de los morteros del estudio	6
Tabla 2. Características asociadas a las fases del proyecto.....	7

Resumen

Los Materiales Asfálticos Mecanomodificables (MAMs) son el resultado de la modificación de materiales asfálticos convencionales (ligantes bituminosos, másticos, morteros y mezclas bituminosas), mediante la adición de materiales con propiedades magnéticas. Los materiales con propiedades magnéticas permiten la inclusión de un tercer dominio de la física (considerando el mecánico y térmico como los dos primeros) que puede ser controlado mediante el uso de campos magnéticos.

Estas capacidades magnéticas de los MAMs podrían representar la solución a algunas de las nuevas necesidades que deben ser resueltas por la ingeniería de carreteras. Entre estas necesidades y como se describirá a lo largo de este documento están:

- (1) El desarrollo de materiales que bajo la acción de campos magnéticos constantes pueden aumentar el valor de su módulo, reduciendo el efecto de deformación permanente causado por el tránsito vehicular pesado en áreas susceptibles a este tipo de deterioros.
- (2) La codificación de la carretera como soporte a la industria de la conducción autónoma.
- (3) El desarrollo de tecnologías de mantenimiento de carreteras orientadas a la eliminación de la nieve o hielo de la superficie de la carretera y a la mejora de la capacidad de autorecuperación de los materiales asfálticos de los firmes en servicio.

En este documento se describirán algunos de los trabajos realizados en el proyecto “Mechanomodifiable asphalt binders for the construction of smart pavements” (proyecto de investigación nº 14 de SMARTi_ETN, financiado por el programa Horizonte 2020 de la Unión Europea, Marie Skłodowska-Curie Actions for research, technological development and demonstration, grant n.721493) desarrollado en el Laboratorio de Ingeniería de la Construcción (LabIC.UGR), de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Granada, España.

Este documento se elabora como propuesta para entrar a concurso en la VIII Edición del “Premio Internacional a la Innovación en Carreteras Juan Antonio Fernández del Campo 2021-2022”, organizado por la Fundación de la Asociación Española de la Carretera (FAEC).

1. Introducción

Los Materiales Asfálticos Mecanomodificables (MAMs) están compuestos por una matriz asfáltica a la que se le han incluido materiales con propiedades magnéticas y/o eléctricas, con la finalidad de hacerlos capaces de reaccionar a la acción de campos magnéticos [1]–[5].

Como se observa en la Figura 1, los tres efectos que producen los campos magnéticos en los MAMs y que pueden ser medidos en laboratorio son: (1) Aumento en el valor de módulo del material, (2) Generación de señales magnéticas y (3) Aumentos de temperatura.

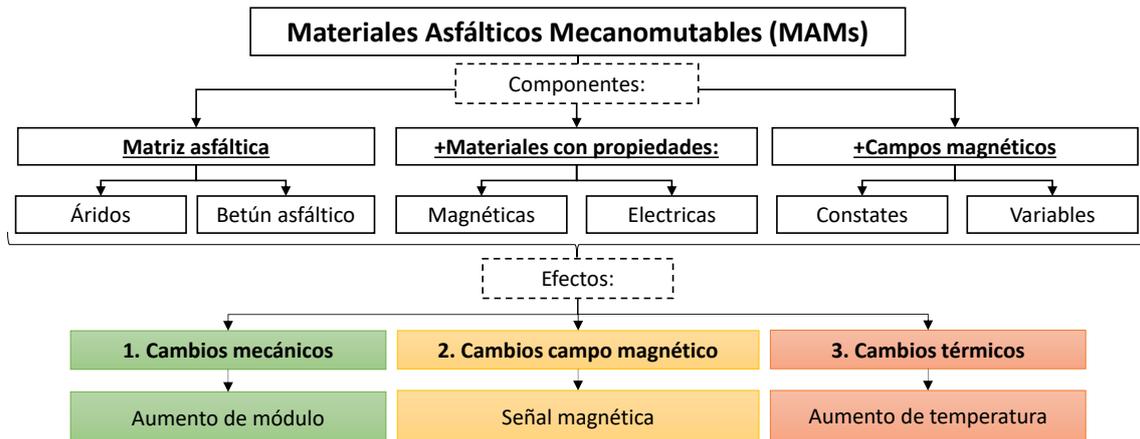


Figura 1. Efectos de los campos magnéticos en los materiales asfálticos mecanomodificables.

Cada uno de estos efectos puede ser asociado a aplicaciones que podrían dar respuesta a necesidades que actualmente deben ser resueltas por la ingeniería de carreteras. Como se ilustra en la Figura 2, el primer efecto se podría vincular al desarrollo de nuevos materiales, con capacidad de mejorar el comportamiento mecánico del pavimento. El segundo efecto, a la codificación de la carretera, como un medio de asistencia al guiado de los vehículos. Y el tercer efecto, a la propuesta de alternativas innovadoras de mantenimiento, específicamente relacionadas con la eliminación de nieve/hielo de la superficie de la carretera y la capacidad de autorecuperación de los materiales asfálticos.

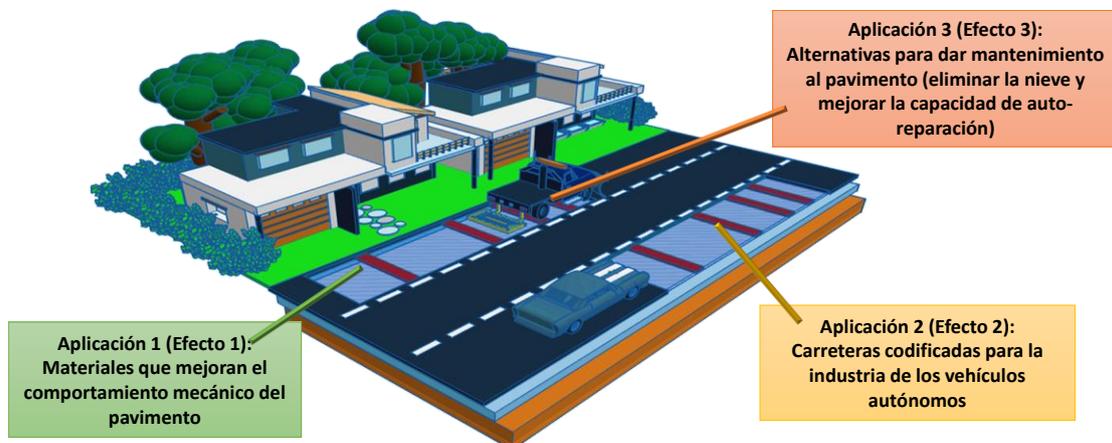


Figura 2. Aplicaciones de los materiales asfálticos mecanomodificables para pavimentos inteligentes.

Considerando que actualmente la mejora de la calidad de vida de las personas para la ingeniería de carreteras, debe ser tomada desde la perspectiva de la transformación de las ciudades en lugares inteligentes (Smart Cities), el desarrollo de materiales como los MAMs debe ser una de las prioridades en temas de investigación.

Los resultados que se muestran en este documento forman parte del proyecto “Mechanomutable asphalt binders for the construction of smart pavements” de SMARTi_ETN (siglas en inglés con significado: Infraestructura del Transporte Sostenible, Multifuncional, Automatizada y Resiliente) [7], financiado por la Unión Europea en el programa Horizonte 2020, bajo las acciones Marie Skłodowska-Curie para investigación, desarrollo tecnológico y demostración (ref n.721493).

2. Objetivo

Evaluación de las capacidades mecánicas, magnéticas y térmicas de los MAMs, en morteros asfálticos a escala de laboratorio, para la construcción de firmes flexibles de carretera con características inteligentes.

3. Materiales y métodos

3.1. Materiales

Los materiales evaluados en este proyecto fueron morteros asfálticos modificados con fibras de acero obtenidas del proceso de reciclado de neumáticos de vehículos fuera de uso. Este tipo de fibras fue seleccionado con el propósito de utilizar materiales reciclados, para promover prácticas sostenibles de construcción, mantenimiento y rehabilitación de pavimentos.

Adicionalmente, considerando la capacidad de las fibras a resistir esfuerzos de tensión y la capacidad amortiguadora de los materiales asfálticos bituminosos en su estado de comportamiento viscoelástico, el diseño de materiales utilizado en este estudio, corresponde morteros fueron enriquecidos con un contenido de betún de 8% sobre el peso total de la mezcla y se seleccionó una arena caliza de tamaño máximo de partícula de 6 mm (Figura 3), para favorecer su uso como sistemas antireflejo de grietas.

El betún asfáltico utilizado en la mezcla corresponde al convencional B50/70 con 65 mm de penetración a 25°C (EN 1426), punto de reblandecimiento de 51°C (EN 1427) y punto de rotura Fraass de -8°C (EN 12593).

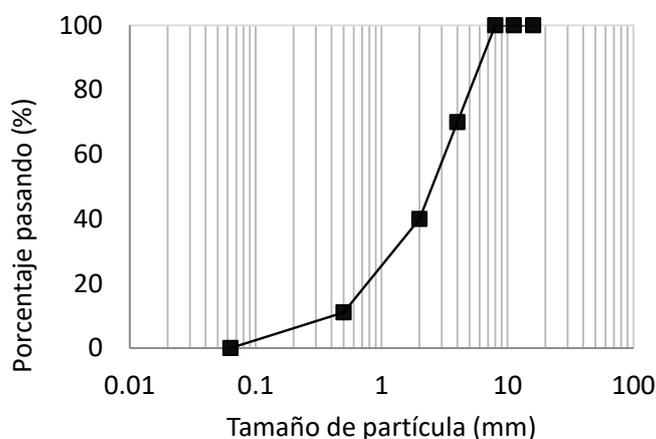


Figura 3. Curva granulométrica de la arena caliza de los morteros.

Las fibras de acero obtenidas del proceso de reciclaje de los neumáticos fuera de uso de los vehículos se muestran en la Figura 4. En este caso se solicitó a la planta de reciclaje, el procesamiento final de las fibras hasta obtener tamaños adecuados que garantizaran suficiente homogeneidad en la mezcla y el desarrollo de prácticas de producción que pudiesen ser accesibles en campo. De una muestra de 50 fibras del producto, la longitud promedio fue de 4.8 mm con coeficiente de variación de 4.8 mm y diámetro de 0.3 mm con coeficiente de variación de 0.3 mm.

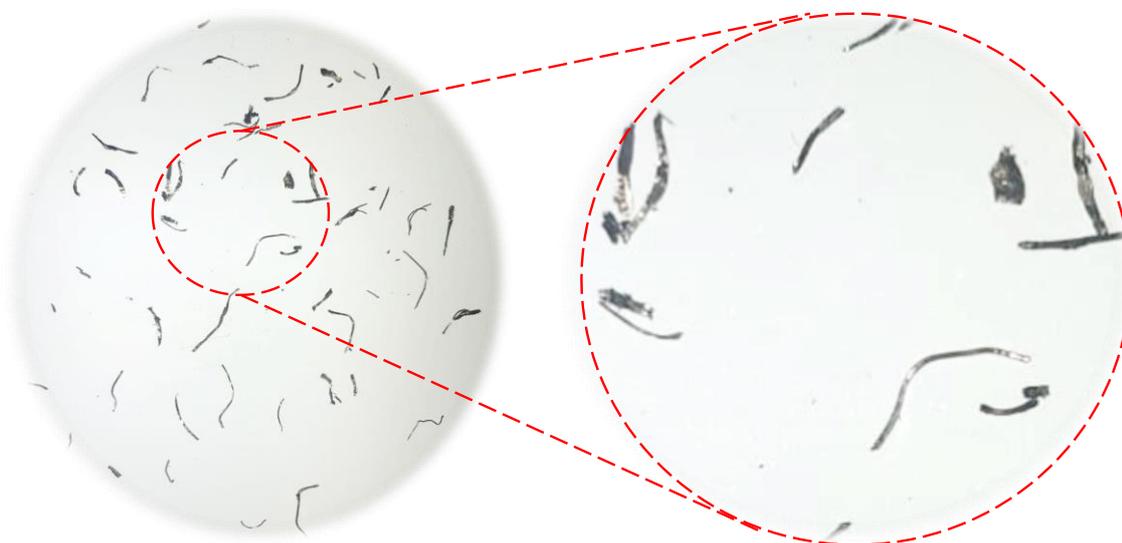


Figura 4. Fibras de acero utilizadas en la fabricación de los morteros.

La resistencia del mortero fue mejorada con el uso de filler de aportación de cemento portland, CEM II/B-L 32,5 N (EN-197-1-2011), cuyo tamaño de partícula es menor a 0.063 mm al 95% y densidad aparente (EN 1097-3-1999) de 0.7 Mg/m². Las proporciones porcentuales de los materiales utilizados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Proporción porcentual de los materiales utilizados en la confección de los morteros del estudio

Tipo de mortero	Proporción por tipo de material (Por peso total de la mezcla)			
	Arena caliza (t _{max} =6 mm)	Fibra de acero	Filler cemento	Betún 50/70
Mortero 1 - 0%F	91%	0%	9%	8%
Mortero 2 - 5%F	89%	5%	9%	8%
Mortero 3 - 11%F	80%	11%	9%	8%
Mortero 4 - 17%F	86%	17%	9%	8%

Nota: Tomado de [6], modificado y adaptado.

3.2. Métodos

Este proyecto se basa en el desarrollo de los tres pilares de investigación que se muestran en la Figura 5. Cada pilar está vinculado a una posible aplicación de los MAMs en la construcción y mantenimiento de carreteras inteligentes. Cada pilar está desarrollado de acuerdo a las siguientes etapas:

- Etapa 1. Estudio bibliográfico, que contempla la revisión bibliográfica referente a campos magnéticos, materiales, aplicaciones y recomendaciones constructivas asociadas a los tres pilares de la investigación;
- Etapa 2. Estudio experimental, que define el diseño experimental seleccionado para el estudio de cada pilar; y
- Etapa 3. Análisis de resultados, que se refiere al procesamiento de datos y la definición de hallazgos.

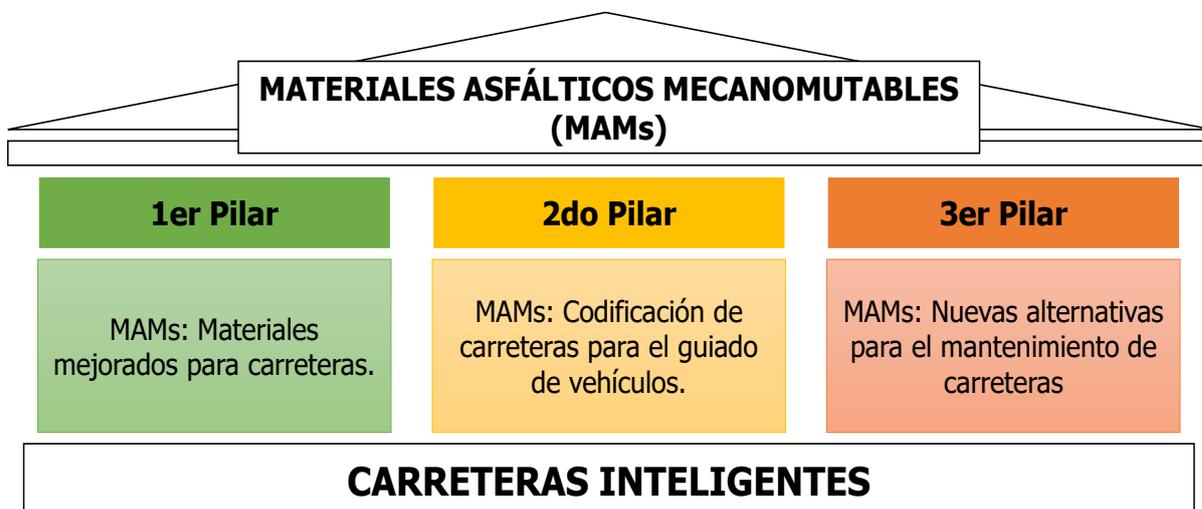


Figura 5. Pilares de investigación del proyecto

El Plan de Trabajo del proyecto se organizó en tres fases asociadas a cada pilar de investigación. Las características de cada fase se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Características asociadas a las fases del proyecto

Característica	Aplicación			
	Fase 1. Materiales con capacidades mecánicas mejoradas	Fase 2. Codificación de carreteras	Fase 3. Nuevas estrategias de mantenimiento	
			Parte 1: Eliminar el hielo/nieve de la superficie de la carretera	Parte 2: Potenciar la capacidad de autorecuperación de mat. asf.
Probetas	0.4 m (largo), 0.05 m (ancho), 0.08 y 0.12 m (altura). Contenido de fibras: 0%, 5%, 11%.	0.12 m (largo), 0.08 m (ancho), 0.02 m (espesor). Contenido de fibras: 0%, 5%, 11%, 17%.	Sistema de dos capas una capa inferior con fibras bajo una capa superior sin fibras. Capa inferior de 0.12 m (largo), 0.08 m (ancho), 0.02 m (espesor) y capa superior de 0.12 m (largo), 0.08 m (ancho), 0.02, 0.03 y 0.04 m (espesor). Contenido de fibras: 0%, 5%, 11%, 17%.	50 mm (largo), 8.62 mm (ancho y alto). Contenido de fibras: 0%, 5%.

Condiciones de ensayo	Tipo de campo: constante, emitido por imanes permanente para evitar la producción de calor. Intensidad de campo magnético: 0 mT, 80 mT, 140 mT, 210 mT. Temperatura: 25°C, 45 °C.	Tipo de campo: constante, emitido por las probetas codificadas con material magnético. Altura de colocación de las probetas (asociado a la intensidad de campo magnético): 0.05 m, 0.1 m, 0.3 m, 0.4 m. Parámetros de ensayo: altura de colocación del sensor, distancia de medición, velocidad de aproximación.	Tipo de campo: variable, generado en una bobina de inducción de 30 cm de diámetro, colocada a diferentes distancias para generar intensidades de campo de: 4.1 mT, 5.3 mT, 7.0 mT. Temperatura de ensayo: -10°C.	Tipo de campo: variable, generado en una bobina de inducción de 30 cm de diámetro, colocada a diferentes distancias para generar una intensidad de campo magnético de 10 mT. Temperatura de ensayo: 35°C.
Dispositivo de ensayo	Figura 6: Frecuencia de resonancia adaptado a la aplicación de campos magnéticos.	Parte 1, 7: Dispositivo especialmente diseñado para medir la influencia de la altura de colocación del sensor, la distancia horizontal de colocación de la probeta y la velocidad de aproximación de la probeta. Parte 2, Figura 8: Prueba de concepto en una sección de prueba y patinete eléctrico.	Figura 9: Dispositivo especialmente diseñado para aplicar campo magnético variable, manteniendo una temperatura ambiental de ensayo de -10°C.	Figura 10: Analizador mecánico dinámico (DMA, por sus siglas en inglés). Adaptación del protocolo para la aplicación de ciclos de tratamiento con campo magnético.
Parámetros evaluados	Cambio de módulo generado por el efecto de la acción de campo magnético, a diferentes temperaturas de ensayo.	Señal magnética emitida por las probetas, para los parámetros de ensayo (altura de colocación del sensor, distancia de medición, velocidad de aproximación).	Aumento de temperatura del sistema, por el efecto del aumento de temperatura en la capa de MAMs que es generado mediante el uso de inducción magnética.	Capacidad de recuperación y extensión de la vida de fatiga de la probeta ante múltiples ciclos de tratamiento con inducción magnética.

En la primera fase se estudiaron las capacidades mecánicas de los MAMs cuando son sometidos a campos magnéticos constantes. Los campos magnéticos constantes producen el movimiento de las partículas magnéticas inmersas en la matriz asfáltica. Estos movimientos generan un tensor de esfuerzos interno que es capaz de cambiar

temporalmente los valores de módulo de los MAMs. En este sentido, en esta fase se evaluó el valor del módulo de especímenes prismáticos de 0.4 m (largo), 0.05 m (ancho), 0.08 y 0.12 m (altura), con contenido de fibras de 0%, 5%, 11% sobre el peso de la del mortero, mientras estos eran sometidos a la acción de campos magnéticos de 0 mT, 80 mT, 140 mT y 210 mT, a temperaturas de 25°C, 45°C. La evaluación se realizó con un dispositivo de frecuencia de resonancia cuyo esquema se muestra en la Figura 6.

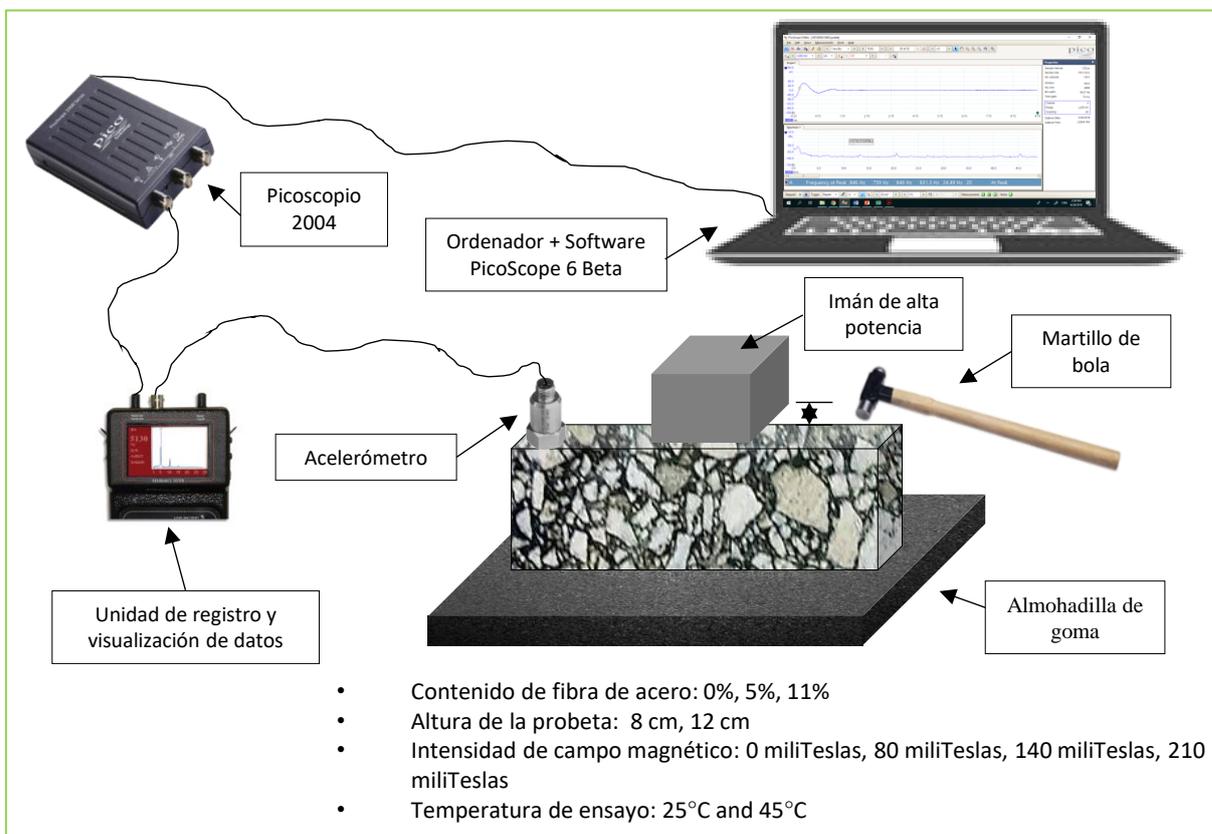


Figura 6. Equipo utilizado en la Fase 1.

En la segunda fase se evaluó la señal magnética emitida por especímenes de 0.12 m (largo), 0.08 m (ancho), 0.02 m (espesor), con contenido de fibras de 0%, 5%, 11% y 17% sobre el peso total del mortero. Para este propósito se diseñó y construyó el sistema que se muestra en la Figura 7. Este sistema utiliza sensores de campo magnético para la cuantificación de la señal magnética emitida por las probetas. Se evaluaron los parámetros influyentes en la calidad de la señal como lo es la altura de colocación del sensor, la distancia de medición y la velocidad de aproximación del vehículo. Con los valores obtenidos se validaron los resultados mediante la elaboración de una prueba de concepto cuyo sistema se muestra en la Figura 8. En esta prueba se utilizó un patinete eléctrico capaz de responder a una instrucción de frenado ante la presencia de una sección de pavimento con alto contenido de material magnético.

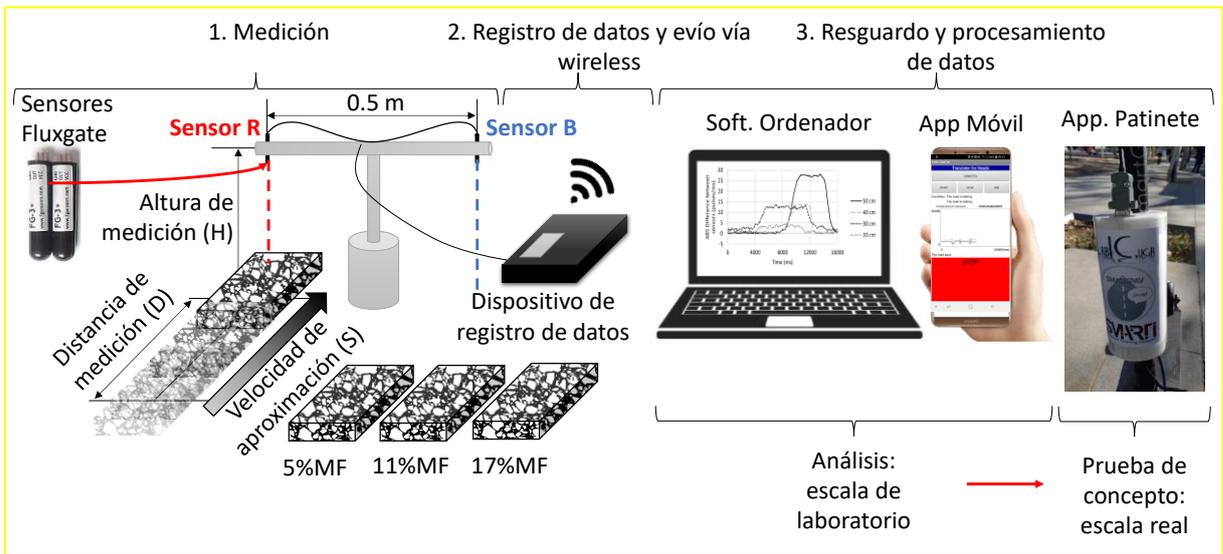


Figura 7. Equipo diseñado para la Parte 1 de la Fase 2: Análisis de laboratorio.

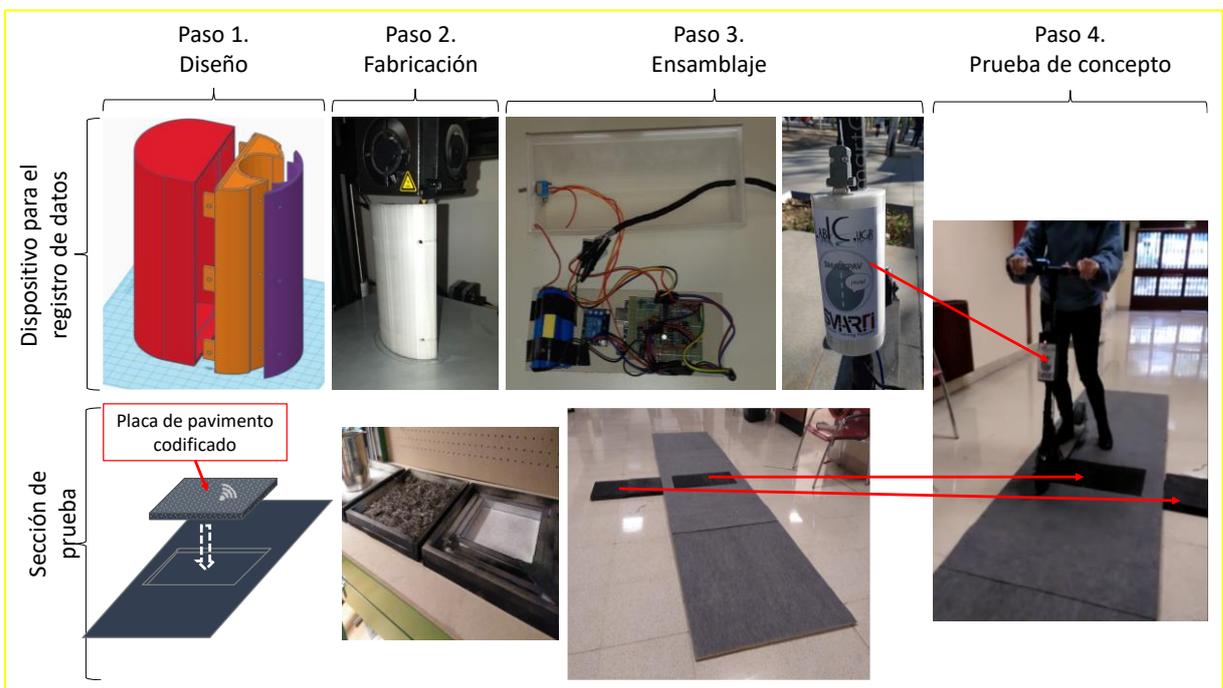


Figura 8. Equipo diseñado para la Parte 1 de la Fase 2: Prueba de concepto.

En la tercera fase se evaluó la capacidad de los MAMs para aumentar su temperatura ante la acción de campos magnéticos variables. Los campos magnéticos variables generados en placas de inducción magnética, producen de manera inalámbrica corrientes eléctricas (corrientes de Foucault) en las fibras de los MAMs. Estas corrientes eléctricas posteriormente mediante pérdidas de energía se transforman en calor mediante el efecto de Joule, aumentando rápidamente la temperatura de las fibras. El calor generado en las fibras es transferido a los materiales circundantes (áridos y ligante bituminoso -altamente capaz de adquirir y reservar calor-), aumentando la temperatura general de los MAMs.

Esta capacidad de aumentar inalámbricamente la temperatura los MAMs, fue estudiada de acuerdo con la posibilidad de utilizar estos materiales para: (1) eliminar el hielo/nieve de la superficie de la carretera, o (2) potenciar la capacidad de

autorecuperación de los materiales bituminosos ante condiciones específicas de temperatura. Como se mostró en la Tabla 2, esta fase fue dividida en dos partes de acuerdo con estas dos posibles aplicaciones de los MAMs.

En la primera parte, se propuso el estudio de un sistema bicapa representativo de la construcción de una capa intermedia de MAMs dentro del sistema de capas bituminosas tradicional de los firmes flexibles de carretera. Este sistema bicapa consistió en una capa superficial de rodadura de materiales bituminosos y una capa inferior de materiales MAMs. Para la capa de MAMs, el contenido de fibras por peso del árido de la mezcla fue de 0% (la condición de referencia), 5%, 11% y 17%. Como se muestra en la Figura 9a, la metodología de ensayo consistió una sucesión de 3 pasos:

- Paso 1. Pre-acondicionamiento de la probeta de sistema bicapa:
 - Colocación de la probeta de sistema bicapa en congelador por 12 horas para alcanzar una temperatura inicial de ensayo de -10°C .

Colocación de la probeta bicapa que será sometida al campo magnético, dentro de un sistema de aislamiento térmico similar al mostrado en la Figura 9b.

- Paso 2. Aumento de temperatura de la capa de MAMs:
 - Activación de un campo magnético de 90 mT por 300s para producir campos magnéticos con intensidades de 4.1 mT, 5.3 mT, 7.0 mT en la capa de MAMs, al colocar una placa de inducción magnética a distancias de 20mm, 30mm y 40mm de la superficie del sistema bicapa.
 - Registro de cambio de temperatura superficial de la cara lateral del sistema bicapa a lo largo de los 300s de aplicación del campo magnético.
- Paso 3. Transferencia de calor y equilibrio térmico del sistema:
 - Desactivación del campo magnético.
 - Registro de temperaturas superficiales de la cara lateral del sistema bicapa hasta alcanzar el equilibrio térmico del sistema.

Con la finalidad de realizar la corrección del aumento de temperatura producido por la temperatura del cuarto de ensayo, las temperaturas de la misma probeta previamente acondicionada y colocada en el sistema de aislamiento térmico dentro del mismo cuarto de ensayo, fueron monitoreadas por el mismo período de ensayo (300s + 1500s).

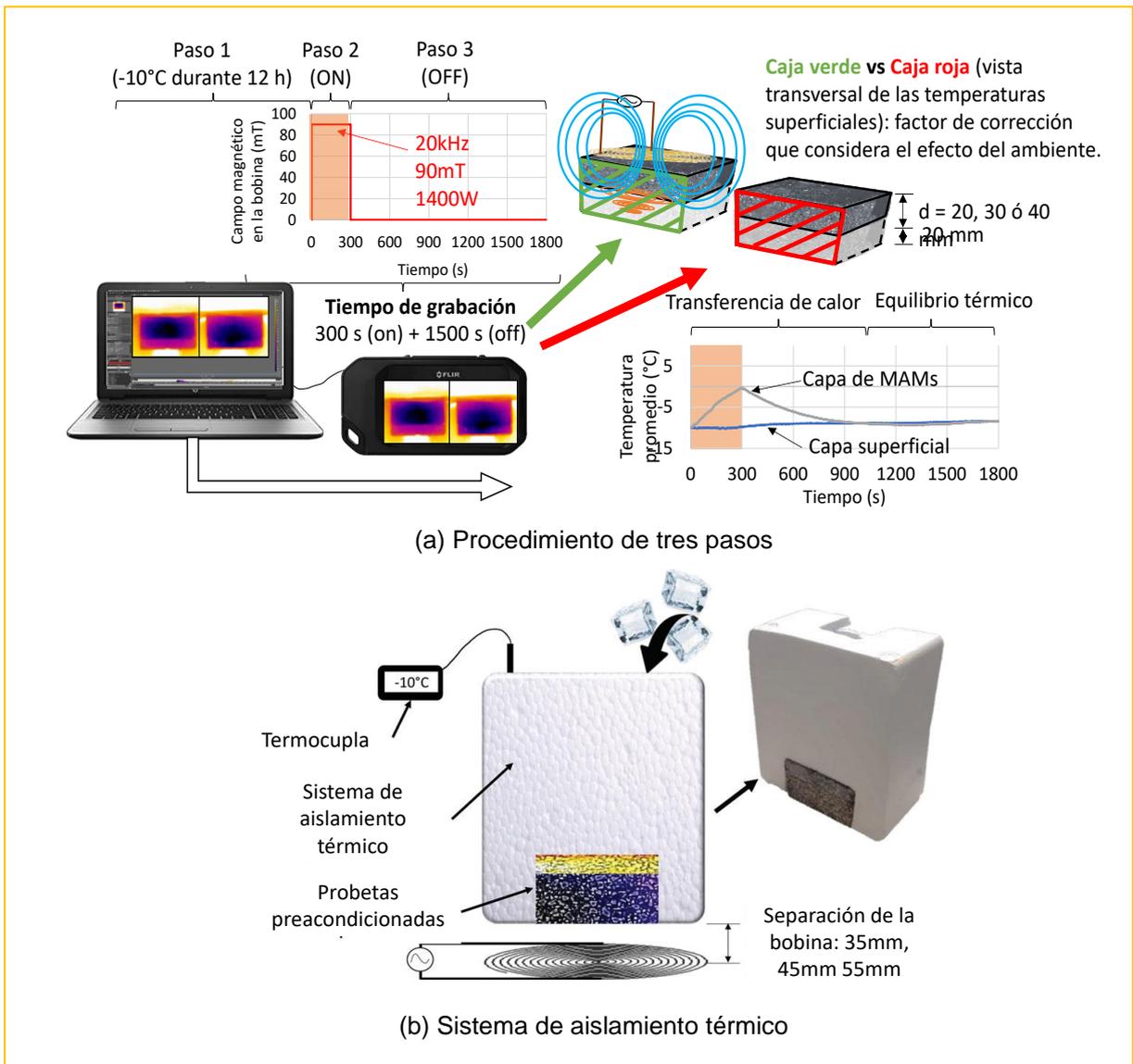


Figura 9. Equipo diseñado para la Fase 3 - Parte 1: Eliminar el hielo/nieve de la carretera.

En la segunda parte, se estudió la posibilidad de potenciar la autorecuperación generada en los MAMs por el flujo de los materiales bituminosos y consecuente sellado de las microgrietas producidas por las solicitudes de tráfico y ciclos estacionales a lo largo del año (cambios de temperatura y precipitaciones). El aumento de temperatura controlado y no invasivo -es decir, inalámbricamente- mediante el uso de campos magnéticos, permite la generación de las condiciones propicias para potenciar la autorecuperación de los MAMs, alargando la vida útil de la carretera si este tipo de tratamientos se aplican en etapas tempranas que es cuando ocurre el microagrietamiento.

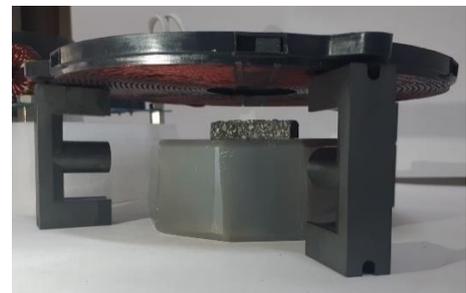
Es por esto que en esta segunda parte se evaluó la capacidad de autorecuperación de los MAMs en morteros con contenido de fibras de 5% por peso total de los áridos, al aumentar la temperatura de probetas de 50 mm (largo) y 8.62 mm (ancho y alto) de manera inalámbrica mediante el uso de un campo magnético de 90 mT ubicado a 15 mm para producir en ella un campo magnético de 10 mT (Figura 10b). Como se muestra en la Figura 10a, se utilizó un equipo de análisis mecánico-dinámico para someter las probetas a ciclos sinusoidales de deformación de 40 μ m a una frecuencia

de 5Hz en dos modalidades de ensayo: (1) al alcanzar la falla total (para efectos del estudio, en el momento de aparición de las macrogrietas -grietas visibles que traspasan la probeta-) de las probetas y (2) aplicando calor por inducción magnética con períodos de descanso durante el ensayo de fatiga DMA. Cada modalidad de ensayo requirió de la siguiente sucesión de pasos:

- Ensayo 1. Calor por inducción y períodos de descanso al finalizar el ensayo:
 - Paso 1: Aplicación de ciclos sinusoidales de deformación de 40 μm a una frecuencia de 5Hz hasta la falla de las probetas.
 - Paso 2: Aplicación de 2.5 min de calor por inducción magnética y restablecimiento manual de la probeta similar a su forma original (áreas superficiales agrietadas en contacto completo).
 - Paso 3: Período de descanso de 1 hora hasta alcanza la temperatura de laboratorio 25°C.
 - Paso 4: Aplicación de ciclos sinusoidales adicionales de deformación de 40 μm a una frecuencia de 5Hz hasta la falla de las probetas.
- Ensayo 2. Calor por inducción y períodos de descanso a lo largo del ensayo:
 - Pasos 1, 3, 5 y 7: Aplicación de 15000 ciclos sinusoidales de deformación de 40 μm a una frecuencia de 5Hz. La selección de 1500 ciclos corresponde al equivalente de la zona de transición de baja a alta resistencia a fatiga. Este valor fue determinado de la curva de ensayo DMA a fatiga completo sin aplicación de calor por inducción magnética.
 - Paso 2, 4 y 6: Aplicación de 2.5 min de calor por inducción magnética seguido de períodos de descanso de 1 hora hasta el equilibrio térmico con el cuarto de ensayo 25°C.



(a) Equipo para análisis mecánico-dinámico (DMA)



(b) Aplicación de campo magnético

Figura 10. Equipo utilizado para la Fase 3, Parte 2: Capacidad de recuperación de los materiales asfálticos.

3. Resultados y discusión

Esta sección contiene tres subsecciones donde se describen y discuten los resultados obtenidos en cada una de las fases de este proyecto. Específicamente se hace referencia a los resultados publicados en los siguientes cuatro artículos de investigación que fueron elaborados como productos de la investigación descrita en este informe:

- 1) P. Leiva-Padilla, F. Moreno-Navarro, G. R. Iglesias, y M. C. Rubio-Gómez, «Analysis of the mechanical response of asphalt materials manufactured with metallic fibres under the effect of magnetic fields», *Smart Mater. Struct.*, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab5762>
- 2) P. Leiva-Padilla, F. Moreno-Navarro, y G. Iglesias, «A Review of the Contribution of Mechanomutable Asphalt Materials Towards Addressing the Upcoming Challenges of Asphalt Pavements», *Infrastructures*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures5030023>
- 3) P. Leiva-Padilla, F. Moreno-Navarro, G. Iglesias-Salto, y M. C. Rubio-Gamez, «Recovery capacity of electroconductive asphalt mortars under the influence of magnetic fields», *Mater. Today Commun.*, vol. 25, p. 101527, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101527>
- 4) P. Leiva-Padilla, F. Moreno-Navarro, G. Iglesias, y M. C. Rubio-Gómez, «Interpretation of the Magnetic Field Signals Emitted by Encoded Asphalt Pavement Materials», *Sustainability*, n.o 7300, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12187300>

3.1. Fase 1 - MAMs: Materiales mejorados para carreteras

Como se ha descrito a lo largo de este documento, la Fase 1 se dirigió a la evaluación de la posibilidad de aumentar temporalmente el valor del módulo de los MAMs. Como se muestra en la Figura 11, se evaluaron los valores de módulo obtenidos mediante el ensayo de frecuencia de resonancia en las probetas de morteros MAMs bajo dos condiciones: (1) sin la aplicación de campo magnético y (2) bajo el efecto de un campo magnético constante de 210 mT, producido por imanes permanentes de alta potencia.

Como se muestra en los gráficos, la aplicación de un campo magnético de 210 mT produce un aumento temporal en el valor de módulo con respecto a la temperatura. La razón de aumento de módulo por grado centígrado se encuentra entre los 0.81 GPa/°C y los 0.92 GPa/°C.

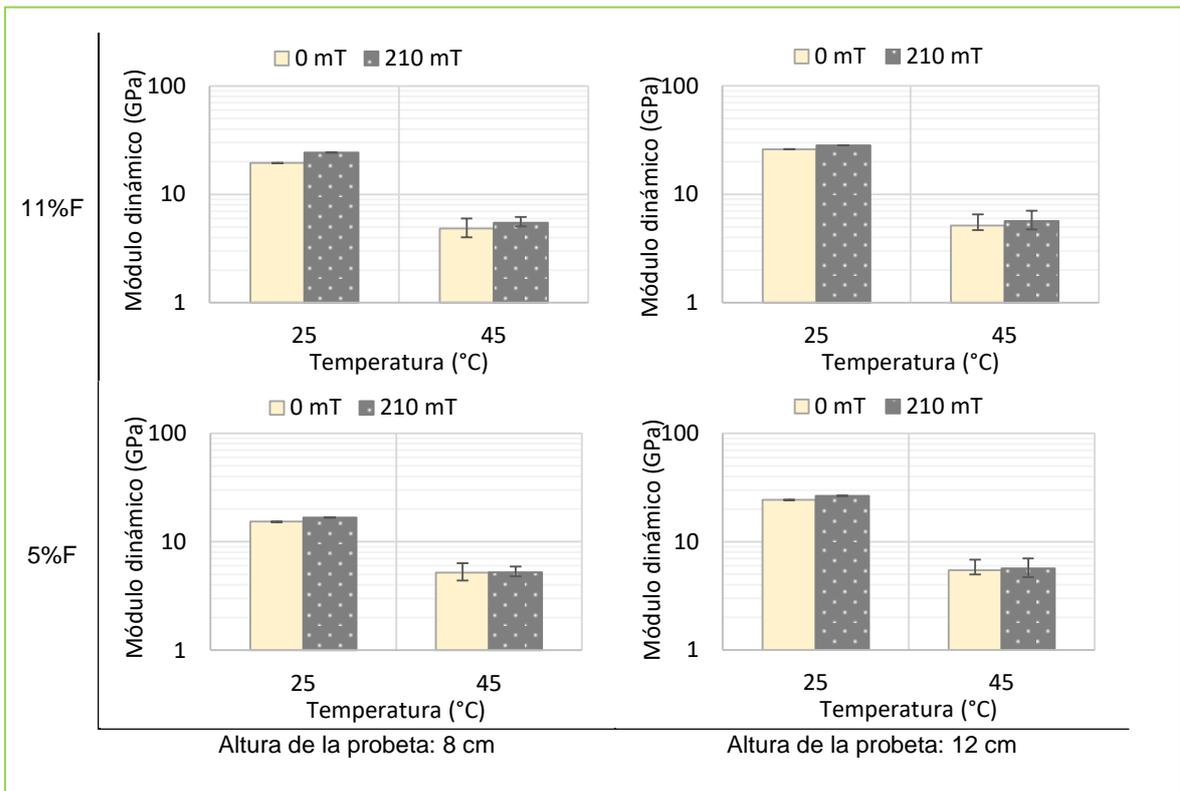


Figura 11. Influencia de temperatura para intensidad del campo = 210 mT.

El porcentaje del aumento de módulo a cada temperatura de ensayo se muestra en la Figura 12. Como se observa en la figura, los mayores porcentajes de cambio de módulo (alrededor de 15%) son obtenidos a 45°C para un contenido de fibras de 11% sobre el peso del árido. El análisis MANOVA (extensión del análisis de varianza ANOVA) de la comparación simultanea de los resultados de módulo a cada una de las temperaturas, y para la condición sin/con la acción de campo magnético, muestra que al 95% de confianza (que significa un valor p menor a 0.05), la altura de las probetas no tiene influencia en los resultados obtenidos a 25°C, contrario a lo que sucede a 45°C. El análisis de t-pareada entre los valores de módulo obtenidos sin/con la acción de campo magnético reveló que para un 95% de confianza, la aplicación de campo magnético produce un aumento temporal significativo en los valores de módulo.

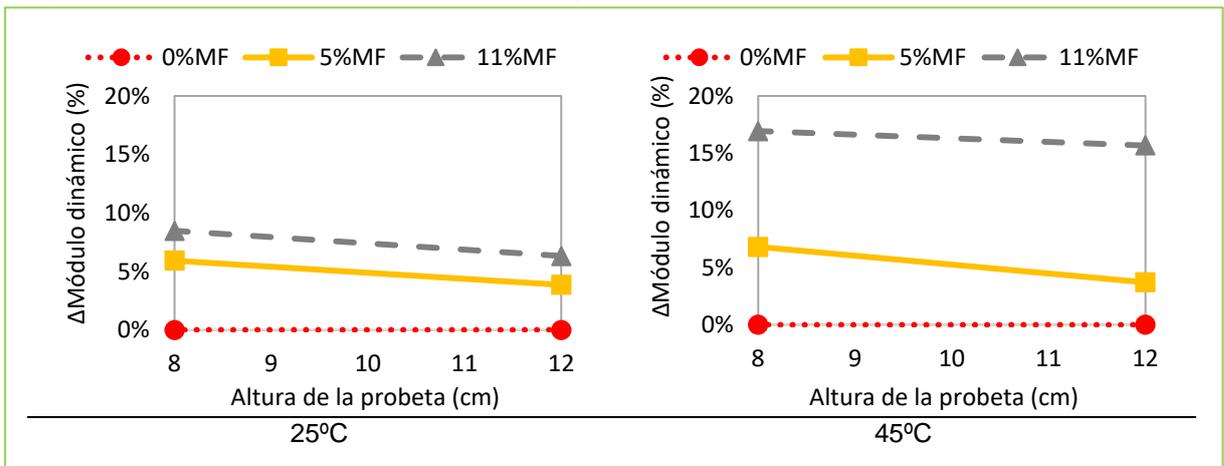


Figura 12. Influencia de la altura de la probeta en el cambio de módulo cuando se aplica una intensidad de campo de 210 mT.

En este sentido, se evaluó el efecto de variar la intensidad del campo magnético aplicado para cada temperatura de ensayo. Como se muestra en la Figura 13, la capacidad de aumentar temporalmente el valor de módulo se reduce al disminuir la intensidad de campo aplicado y al aumentar la temperatura. Por ejemplo, el valor de cambio de módulo por mT aplicado para de 0.012 GPa/mT a 0.0016 GPa/mT cuando la temperatura pasa de 25°C a 45°C.

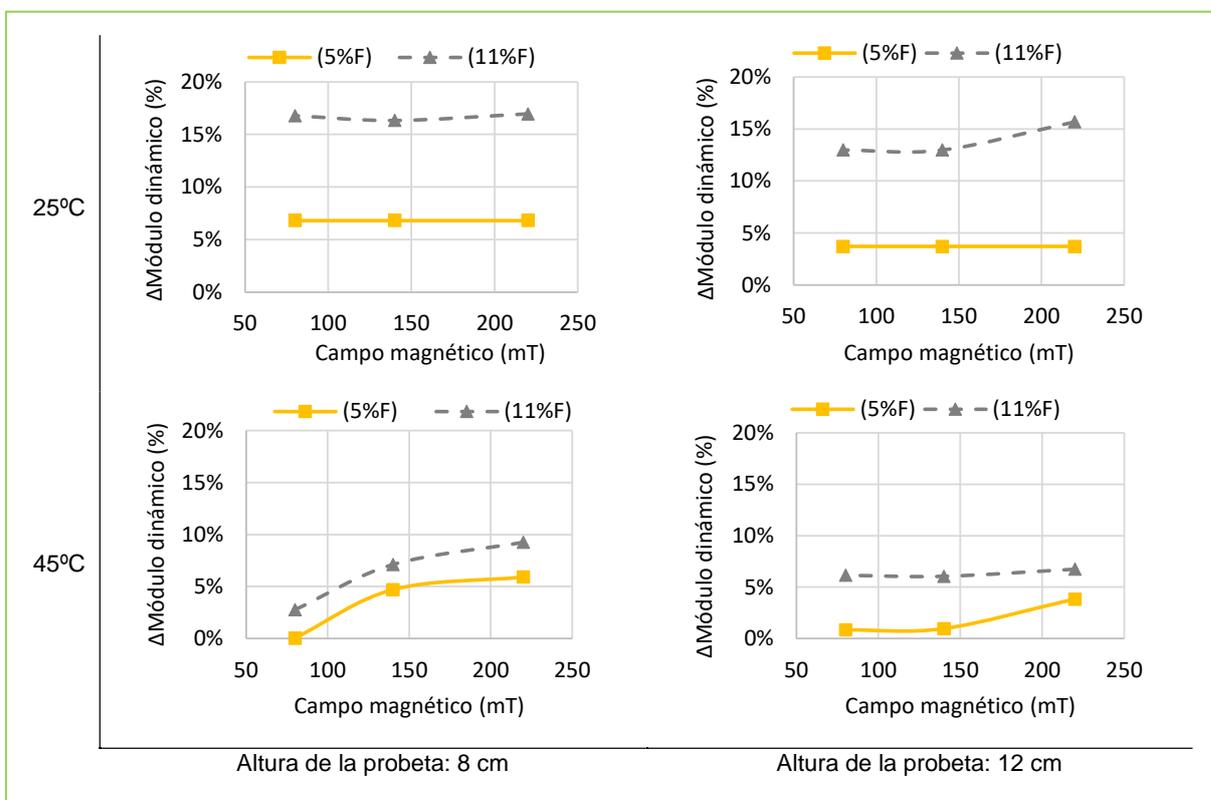


Figura 13. Influencia de la intensidad de campo magnético.

3.2. Fase 2 - MAMs: Codificación de carreteras para el guiado de vehículos

Para la Fase 2, se cuantificó en laboratorio la señal magnética emitida por los MAMs para su posible uso en la codificación de carreteras con la finalidad de dar soporte a la implementación de los sistemas asociados a la condición autónoma de vehículos.

Como se muestra en la Figura 14, durante la primera condición de ensayo se evaluó la capacidad de percibir la señal magnética emitida por una probeta con un contenido de 11% de fibras de acero por peso de los áridos, ante variaciones en la altura de ubicación de un sensor de campo magnético FLUXGATE. Como se observa en los resultados, el sensor es capaz de identificar la probeta codificada por debajo de 0.11 m. Esto significa que, para este tipo de sensor y condiciones de ensayo presentes en laboratorio, por debajo de este valor de altura es posible codificar el pavimento con contenidos de fibra iguales o menores a 11% sobre el peso de los áridos.

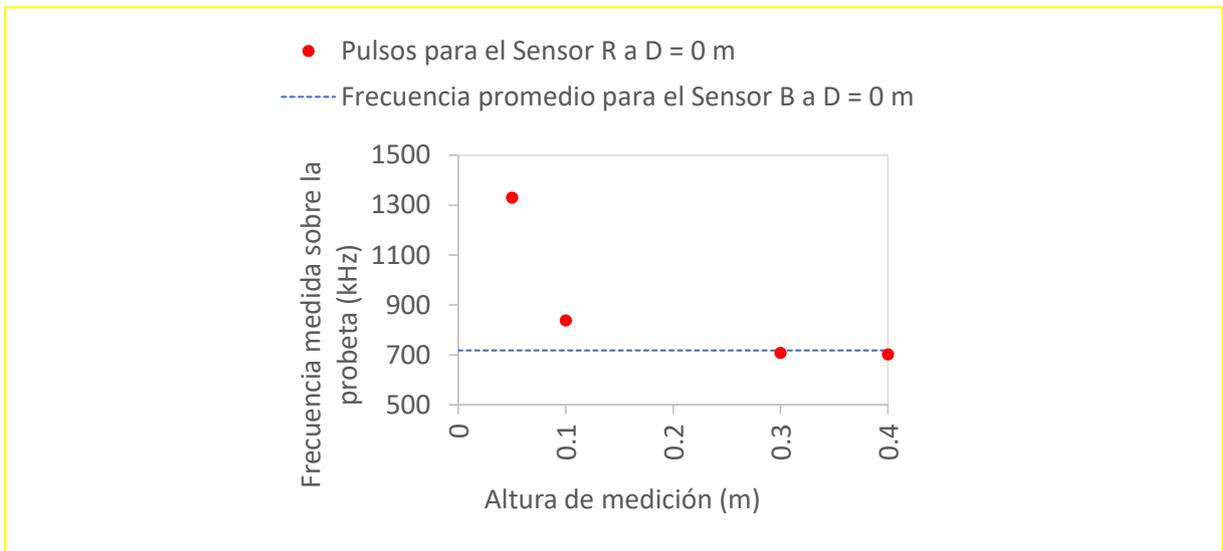


Figura 14. Influencia de la altura de medición.

A partir de los resultados de la figura anterior, se fijó la altura de ubicación del sensor a 10 cm y se evaluó la distancia horizontal de aproximación más cercana dentro de la cual es posible que el sensor comience a detectar la señal magnética emitida por la probeta codificada. Como se observa en la Figura 15, a distancias horizontales menores a 0.4 m, el sensor comienza a percibir la probeta.

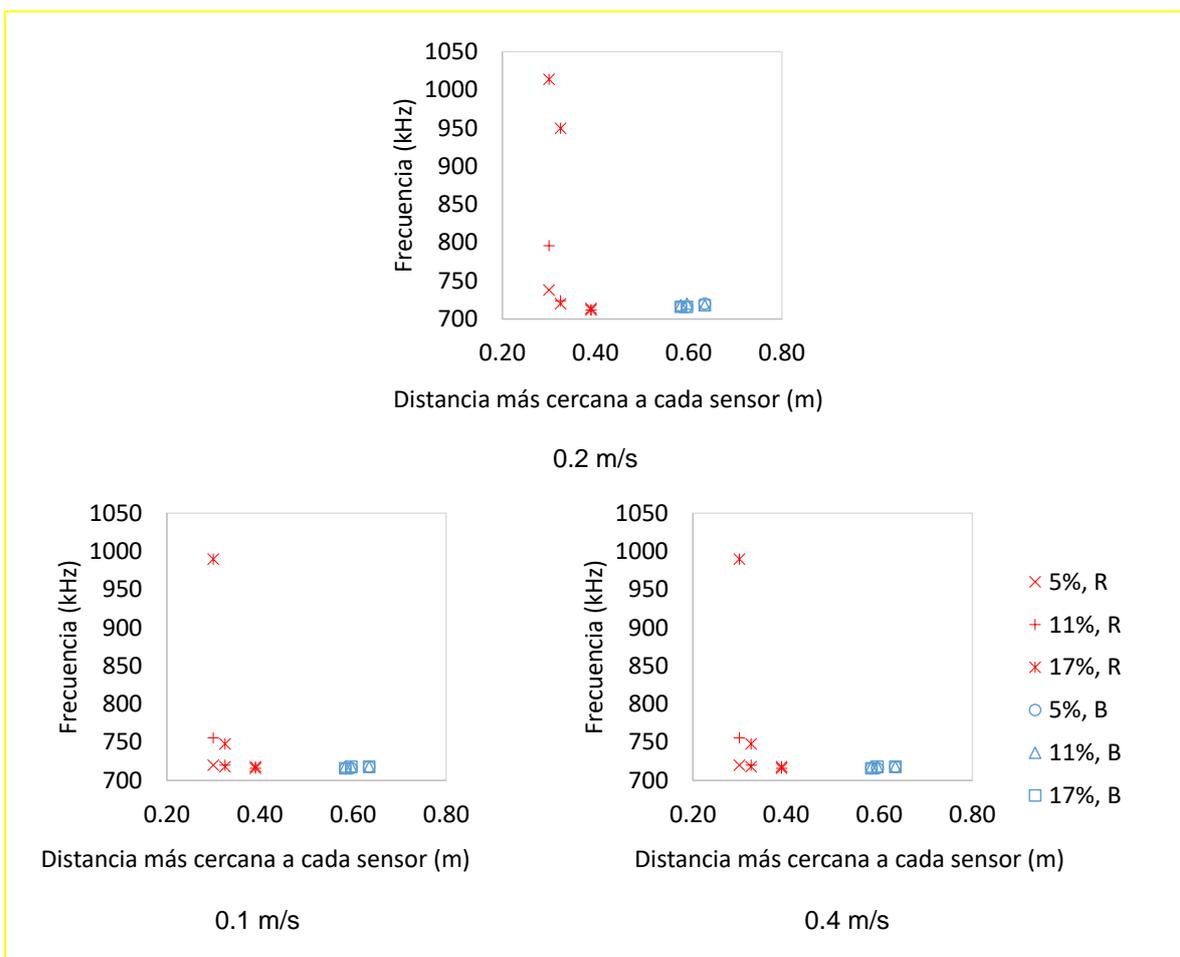


Figura 15. Influencia de la distancia más cercana a cada sensor, R: sensor rojo, B: sensor azul.

Para evaluar la influencia de la velocidad de aproximación de cada probeta de acuerdo con el contenido de fibra de acero, como se muestra en la Figura 16, para la misma altura de ubicación del sensor, los resultados revelan que a menor velocidad y mayor contenido de fibra la señal se intensifica. Los mayores resultados fueron obtenidos para contenidos de fibra de 17%, logrando por ejemplo un aumento en la señal de 26% al pasar de los 0.4 m/s a los 0.2 m/s.

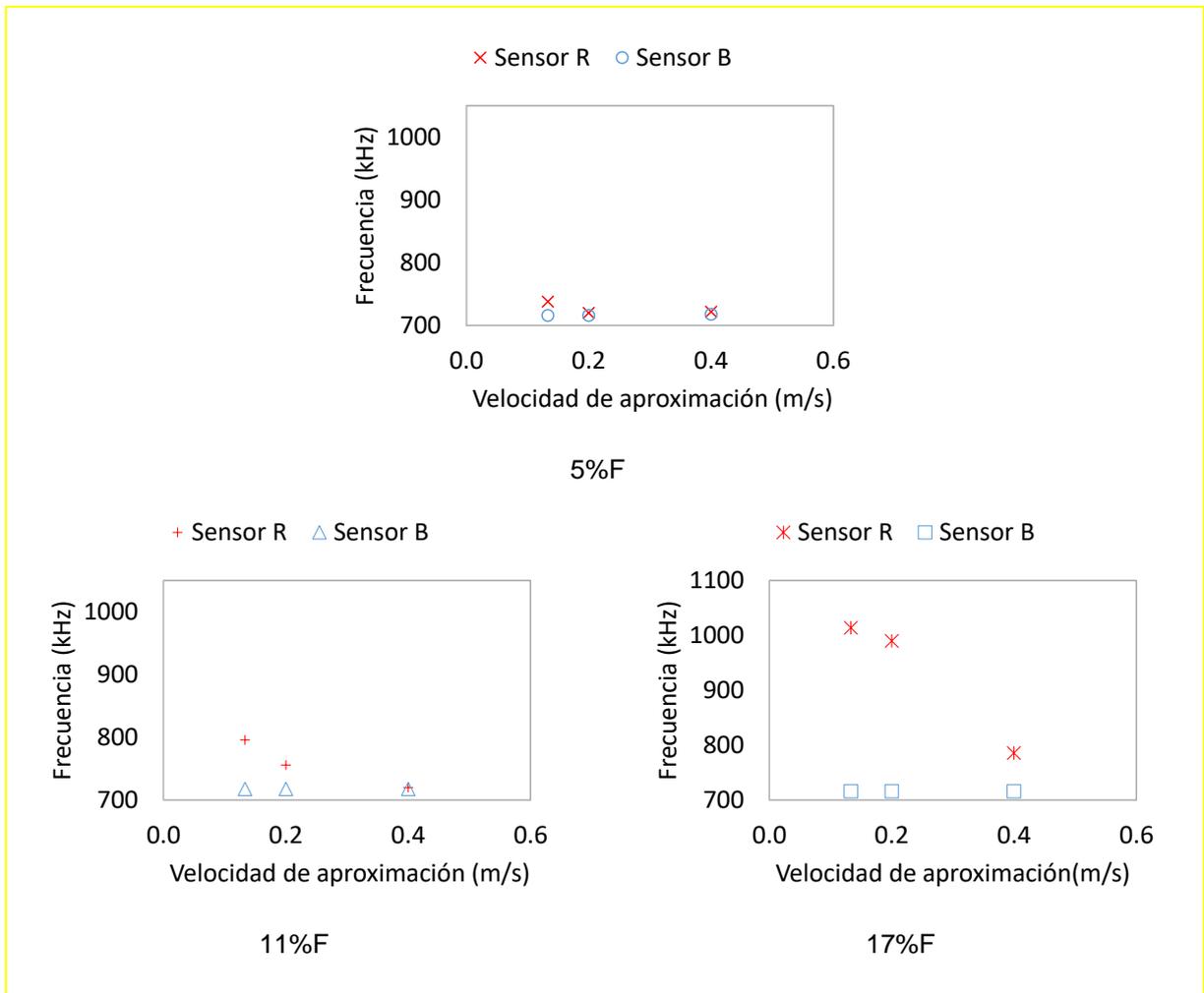


Figura 16. Influencia de la velocidad de aproximación a la $D = 0$.

Con los resultados anteriores se definió posteriormente una configuración adecuada para la definición de una prueba de concepto utilizando un patinete eléctrico. Como se muestra en la Figura 17, esta configuración se basó en la asignación de una instrucción de frenado dentro de los comandos que rigen el funcionamiento del patinete, cuando este pasa sobre una zona de pavimento codificado que emite una señal magnética con una frecuencia de 740 kHz.

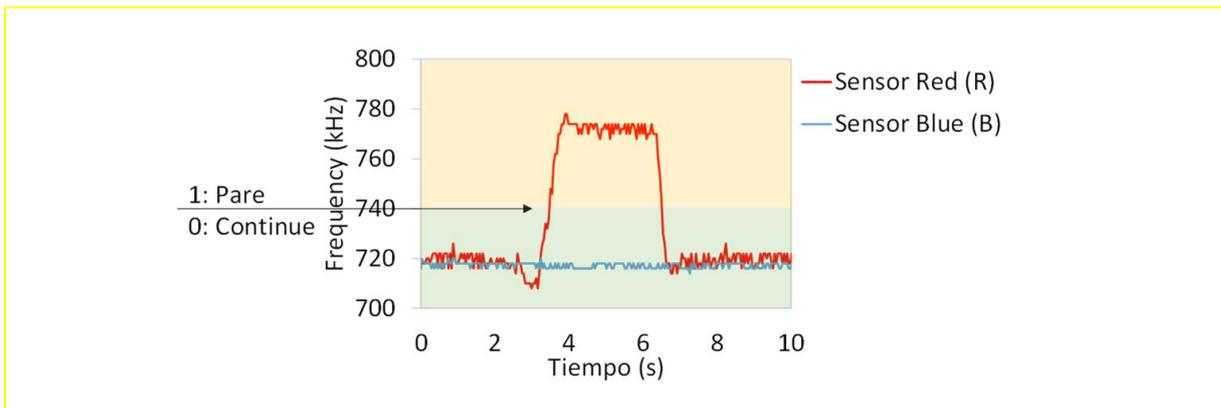


Figura 17. Prueba de concepto.

3.3. Fase 3 - MAMs: Nuevas tecnologías para el mantenimiento de carreteras

La Fase 3 se divide en dos estudios relacionados con la capacidad de los MAMs para aumentar temperatura ante la acción de campos magnéticos variables. Estos campos son generados de manera inalámbrica en bobinas de inducción magnética.

El primer estudio estuvo relacionado con la posibilidad de utilizar esta capacidad de los MAMs para la eliminación del hielo/nieve de la superficie de la carretera. El segundo estudio con la posibilidad de controlar las temperaturas de los MAMs para favorecer las condiciones a las cuales los materiales asfálticos tienden a “auto-recuperarse/curarse”. A continuación, se describen ambos estudios.

3.3.1. Eliminación del hielo/nieve de la superficie de la carretera

Para el primer estudio, se propuso cuantificar el aumento de temperatura producido al aplicar campos magnéticos sobre una capa inteligente de MAMs que es incluida como intercapa dentro de las capas asfálticas del firme. Como se muestra en la Figura 18, la aplicación de un campo magnético neto de 7.0 mT dentro de la capa de MAMs (de los 0s a los 300s), produce incrementos de temperatura en esta capa que posteriormente por medio de la segunda ley de la termodinámica, aumentan la temperatura del sistema por equilibrio térmico (de los 300s a los 1800s).

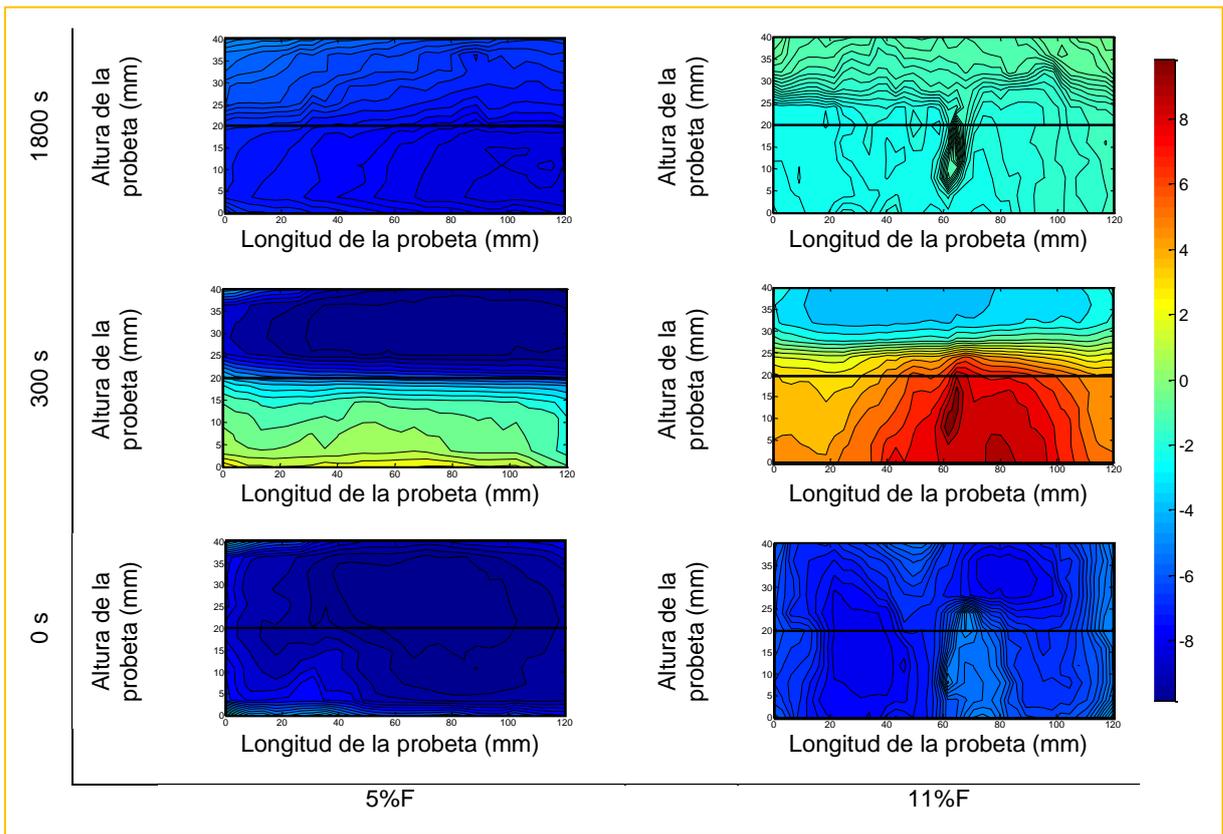


Figura 18. Distribución de temperaturas en la cara lateral de la probeta durante el experimento, 7.0 mT de campo magnético y capa superficial de 20 mm.

Nota: Tomado de [10] adaptado y traducido.

En la Figura 19 se muestran los valores de cambio de temperatura promedio obtenidos, ante variaciones en la intensidad de campo magnético aplicada (4.0 mT, 5.3 mT y 7.0 mT) tanto a los 300 s y como a los 1800 s. Estos momentos corresponden respectivamente al final del tiempo de aplicación del campo y el momento en que el sistema casi ha alcanzado el equilibrio térmico. Los resultados demuestran que los valores de cambio obtenidos son mayores al aumentar la intensidad de campo magnético aplicado. Adicionalmente, se puede observar el aumento general de la temperatura por equilibrio térmico.

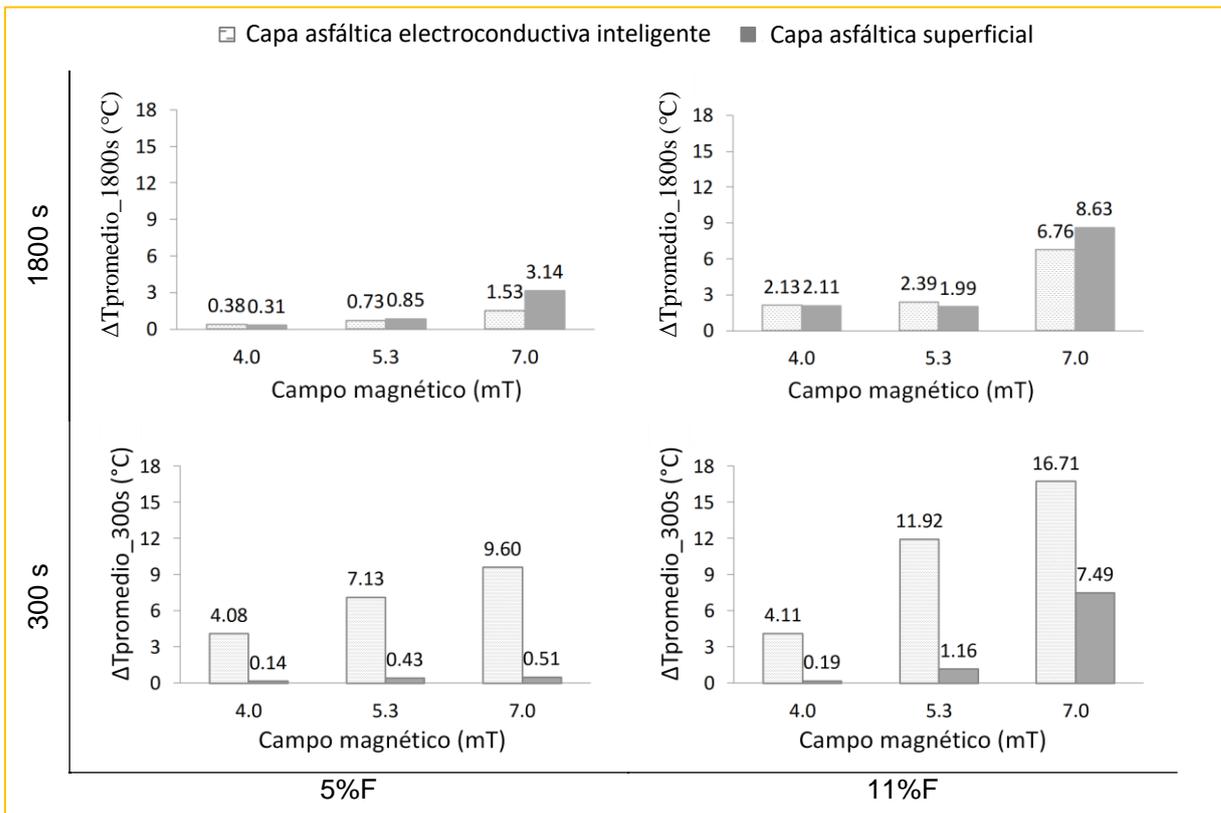


Figura 19. Influencia de la intensidad del campo magnético en la temperatura a los 300 s y 1800 s.

3.3.2. Potenciar las capacidades de “auto-recuperación/curado” de los materiales asfálticos

Para el segundo estudio de esta fase se evalúa la capacidad de “auto-recuperación/curado” producida al aumentar la temperatura de los MAMs de manera controlada mediante la aplicación de campos magnéticos.

El principio de funcionamiento detrás de esta aplicación se sustenta en las propiedades viscoelásticas termo-dependientes de los materiales asfálticos. El ligante bituminoso a temperaturas sobre el punto de reblandecimiento empieza a fluir rellenando las microgrietas formadas durante las etapas tempranas de fatiga mediante el mecanismo de capilaridad.

La Figura 20 muestra las curvas de valor de módulo promedio por ciclo de carga para los dos experimentos realizados en este estudio.

Para el Experimento 1, la Figura muestra la recuperación de módulo y los ciclos adicionales producidos por la aplicación de un único tratamiento de 2.5 minutos de calor por inducción seguido de 1 hora de reposo al finalizar el ensayo. El ensayo se consideró finalizado para este experimento como el momento en que la probeta presenta un agrietamiento que pasa desde la cara inferior hasta la cara superior de la probeta. Esto ocurre a los 60000 ciclos aproximadamente.

Para el Experimento 2, la Figura 20 muestra la extensión de la zona de caída de módulo que permite mantener el material en mejores condiciones a lo largo de los 60000 ciclos de carga para los dos tipos de tratamiento aplicado, múltiples tratamientos de 1 hora de reposo o múltiples tratamientos de 2.5 minutos de calor por inducción seguido de 1 hora de reposo.

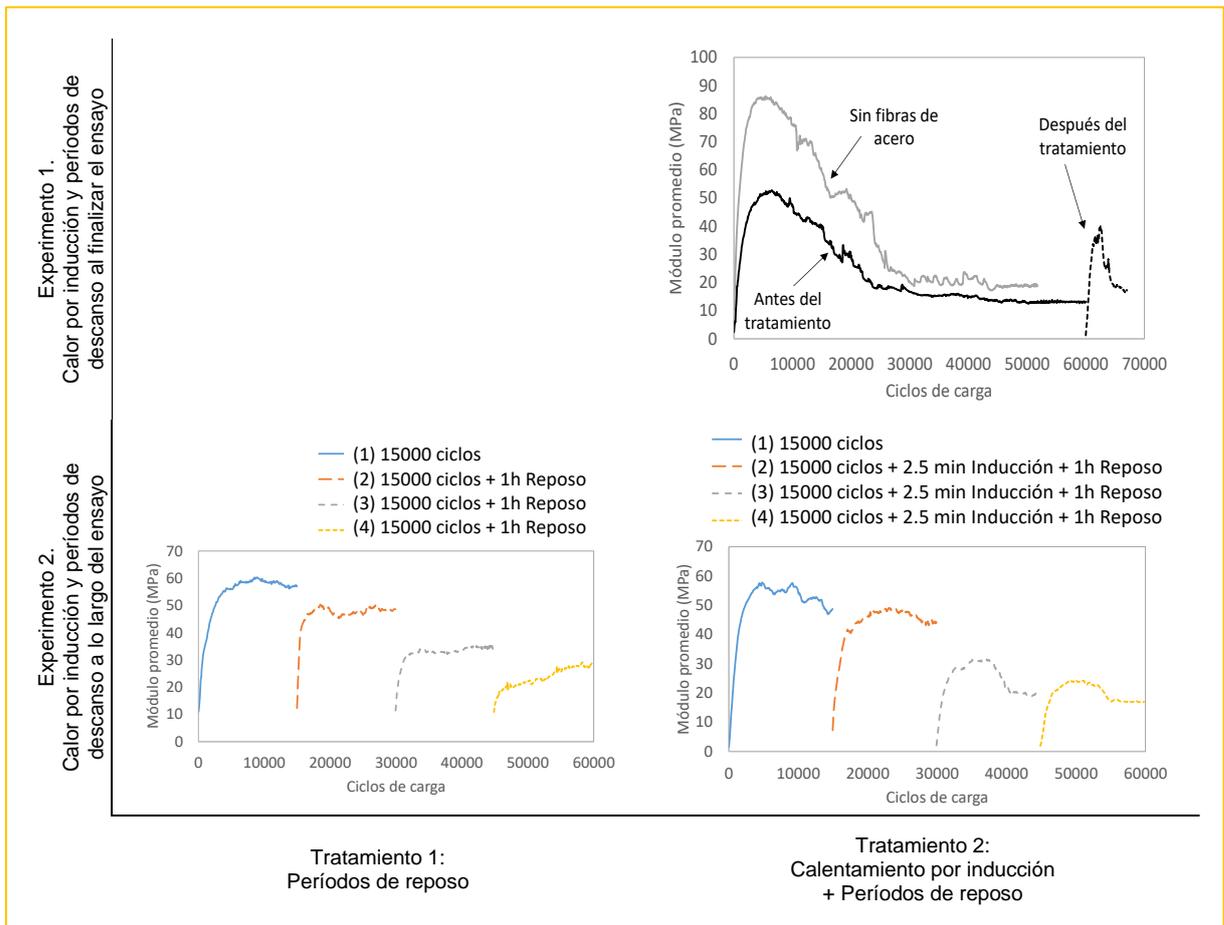


Figura 20. Resultados del módulo promedio para cada experimento del estudio.

La transformación de la Figura 20 en curvas de esfuerzo vs ciclo de carga se muestra en la Figura 21. A partir del análisis de la curva del Experimento 1 se puede observar que la fatiga de bajo ciclo, donde ocurre el microagrietamiento, se define a los 15000 ciclos y es este el valor utilizado para la aplicación de los tratamientos periódicos del Experimento 2. Si se comparan los ciclos aplicados a un esfuerzo de 0.14 MPa (el punto de la vida a bajo ciclo para el Experimento 1 previo a la aplicación del tratamiento) para las tres curvas, la vida a fatiga por la aplicación de períodos de descanso es 2.4 veces mayor, mientras que, si adicionamos ciclos de inducción previo a estos ciclos, la vida a fatiga es 2.9 veces mayor.

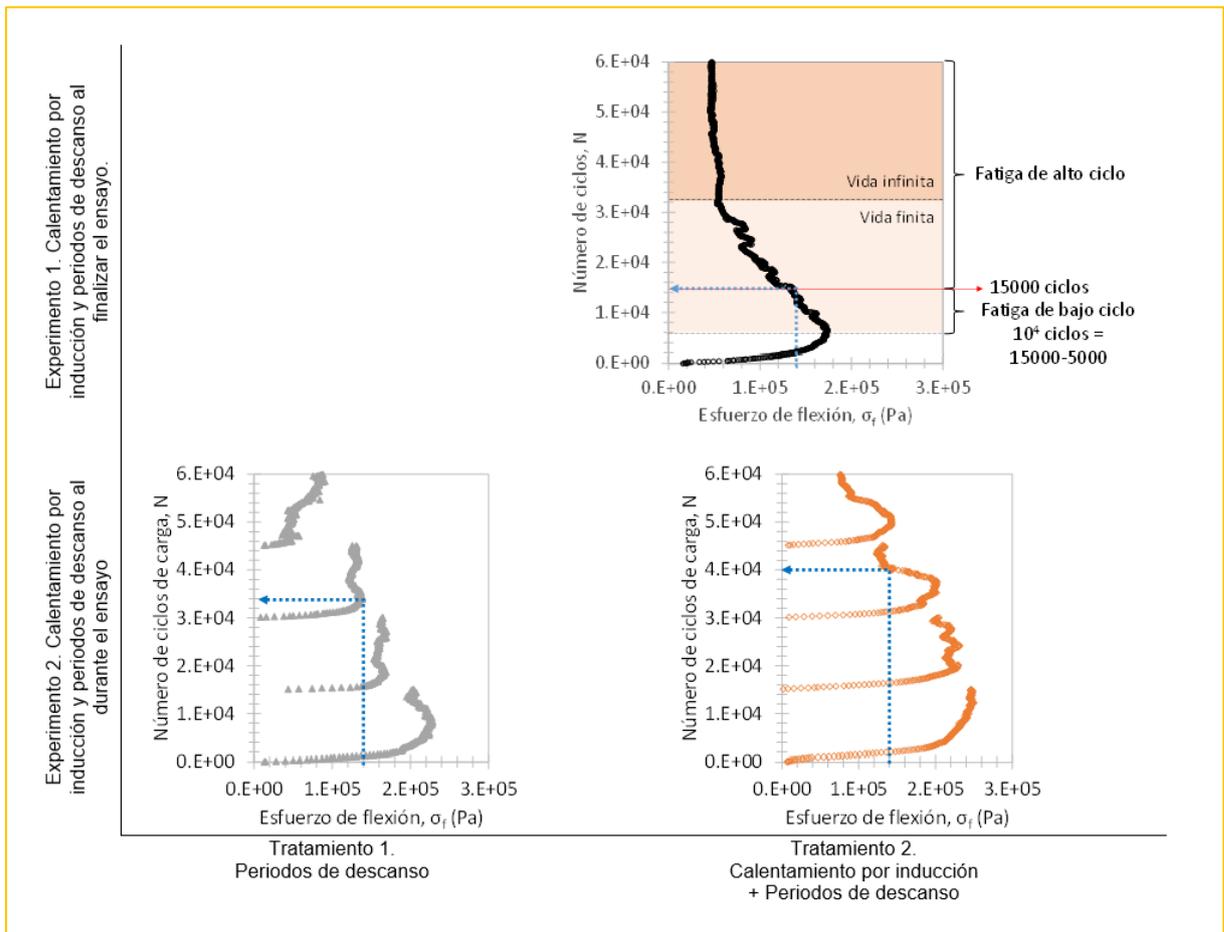


Figura 21. Curvas de esfuerzo vs ciclo de carga.

Con la finalidad de cuantificar la “auto-recuperación/curado” obtenido, la Figura 22 muestra los correspondientes valores de porcentaje de recuperación, obtenidos de la relación de las áreas bajo la curva de módulo vs ciclo de carga de la Figura 20.

Tal como se puede observar, en el Experimento 1 se obtuvo una recuperación de 14%, que corresponde a la recuperación obtenida en el Experimento 2 para el primer ciclo del Tratamiento 1 (solo periodos de descanso) y 1.5% más de la mitad para el Tratamiento 2 (calor por inducción + periodos de descanso). Para el Tratamiento 2, se observa que la mayor parte de la recuperación se da en el primer ciclo de tratamiento, que corresponde la etapa de microagrietamiento de la probeta. Por diferencia entre los porcentajes de recuperación del tercer y cuarto ciclo, si logra un 4% (29%-25%) y 3% (32%-29%) adicional de recuperación en la etapa de macroagrietamiento de la probeta.

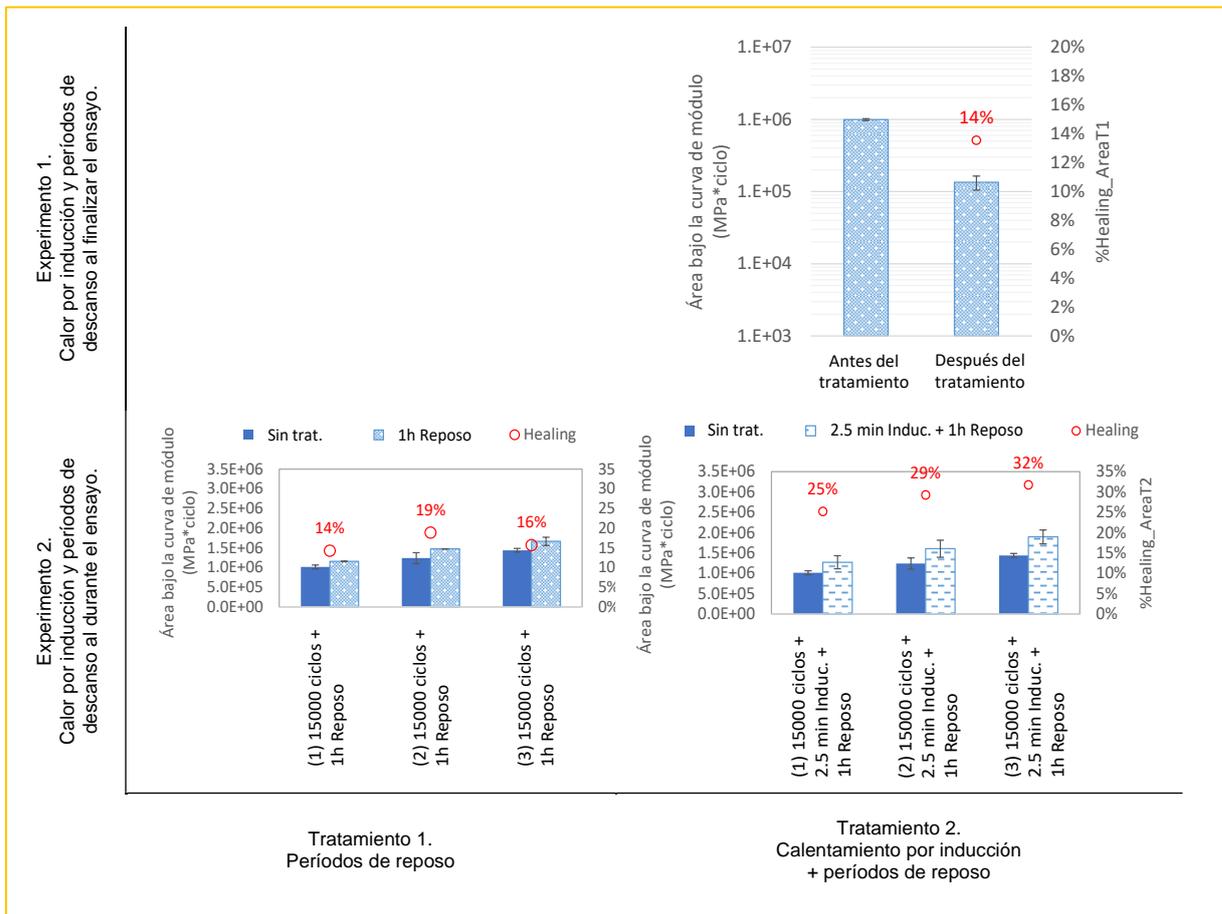


Figura 22. Resultados de recuperación obtenida para cada experimento del estudio.

4. Conclusiones

El presente documento muestra la evaluación, en laboratorio y a la escala de morteros, de las características mecánicas, magnéticas y térmicas de los Materiales Asfálticos Mecanomutables ante la aplicación de campos electromagnéticos. La inclusión de un dominio físico controlable como es el caso del dominio electromagnético, podría significar la definición de estrategias de gestión inteligentes para los firmes flexibles de carretera. Esto surge ante la necesidad de desarrollar carreteras que tengan una función más amplia que el transporte de bienes y servicios. La carretera debe responder a la modernización tecnológica actual que exige el desarrollo de nuevos materiales como es el caso de los materiales asfálticos mecanomutables. Los resultados obtenidos como resultado de este proyecto permiten concluir que:

- La aplicación de campos magnéticos constantes mediante el uso de imanes de alta capacidad magnética, produce un movimiento controlado de las partículas magnéticas que componen los materiales asfálticos mecanomutables. El movimiento de las partículas magnéticas de los MAMs genera un tensor de esfuerzos interno responsable del cambio temporal de módulo de estos materiales. Los resultados de los ensayos realizados en este proyecto mostraron que un imán permanente con una intensidad de campo magnético de 210 mT puede producir un aumento de módulo de 15% en probetas de 12 cm de altura, preconditionadas a una temperatura de 45°C y con contenidos de fibra de 11% sobre el peso de los áridos de la mezcla.

- Incluir materiales con propiedades magnéticas dentro de la mezcla asfáltica permite que estos materiales puedan ser detectados por sensores de campo magnético. La cantidad de material magnético adicionada a la mezcla y la distancia de ubicación vertical/horizontal del sensor influyen en la intensidad de campo magnético percibido por el sensor. Los resultados del ensayo mostraron que, para el tipo de sensores y las condiciones de laboratorio utilizados en este experimento, la señal magnética comienza a ser percibida cuando el sensor se coloca a 11 cm de distancia vertical y 40 cm de distancia horizontal respecto a una probeta con 11% de contenido de fibra sobre el peso de los áridos.
- La aplicación de campos magnéticos variables mediante el uso bobinas de inducción, permiten aumentar de manera inalámbrica y controlada, la temperatura de los materiales asfálticos mecanomutables. El aumento de temperatura producido puede ser utilizado para la propuesta de estrategias alternativas de eliminación de hielo/nieve de la superficie de la carretera o la generación de temperaturas a las cuales se puede producir la autorecuperación de los materiales asfálticos. Los cambios de temperatura que se pueden producir mediante esta estrategia dependen de la cantidad de material electromagnético utilizada, la intensidad de campo magnético aplicada y su duración. En el primer caso, los resultados de este estudio mostraron que para una capa de 20 cm de MAMs se puede producir un aumento de temperatura de 16.71°C al haber aplicado un campo magnético de 7.0 mT por 300s en probetas con 11% de fibra de acero sobre el peso de los áridos del mortero. En el segundo caso, los resultados mostraron que aplicar 2.5 min de calor por inducción, seguido de 1 h de reposo cada 15000 ciclos de aplicación de carga a fatiga con el dispositivo DMA, puede producir una recuperación de las probetas de 32% para contenidos de fibras de 5% sobre el peso del árido de mortero.
- Este proyecto presenta los resultados obtenidos de la investigación exploratoria en laboratorio y a escala de morteros. Por tanto, las investigaciones a futuro deben ser dirigidas hacia la evaluación de mezclas asfálticas y finalmente tramos de prueba a escala real, con la finalidad de proveer las recomendaciones técnicas requeridas para su posible utilización en proyectos reales. Adicionalmente, deberá ser considerado el uso de otros materiales con propiedades electromagnéticas que pudiesen ser obtenidos como residuos de diferentes procesos industriales o procesados en tamaños menores. Finalmente, y reconociendo la importancia de evaluar el impacto ambiental de las nuevas tecnologías, se recomienda considerar también la evaluación del ciclo de vida no solo a nivel de la producción de estos materiales, sino que también a su uso a lo largo de la vida de la carretera.

5. Agradecimientos

El desarrollo de este proyecto fue posible gracias al proyecto de investigación “Mechanomutable asphalt binders for the construction of smart pavements” de SMARTi_ETN, financiado por la **Unión Europea** en el programa **Horizonte 2020**, bajo las **acciones Marie Skłodowska-Curie** para investigación, desarrollo tecnológico y demostración (ref n.721493), realizado en el Laboratorio de Ingeniería de la Construcción (LabIC.UGR), de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Granada, España.

6. Referencias

- [1] F. Moreno-Navarro, G. R. Iglesias, and M. C. Rubio-Gómez, "Development of mechanomutable asphalt binders for the construction of smart pavements," *Mater. Des.*, vol. 84, pp. 100–109, Nov. 2015, doi: 10.1016/J.MATDES.2015.06.098.
- [2] F. Moreno-Navarro, G. R. Iglesias, and M. C. Rubio-Gómez, "Ligante modificado con propiedades mecánicas controlables por campos magnéticos," PCT/ES2014/071002, 2016
- [3] F. Moreno-Navarro and M. C. Rubio-Gómez, "Development of new smart materials for the pavements of the future | Desarrollo de nuevos materiales inteligentes para pavimentos del futuro," *Carreteras*, vol. 4, no. 217, pp. 56–65, 2018.
- [4] P. Leiva-Padilla, F. Moreno-Navarro, G. Iglesias, and M. C. Rubio-Gamez, "A review of the contribution of mechanomutable asphalt materials towards addressing the upcoming challenges of asphalt pavements," *Infrastructures*, vol. 5, no. 3, 2020, doi: 10.3390/infrastructures5030023.
- [5] P. Leiva-Padilla, F. Moreno-Navarro, G. R. Iglesias, and M. C. Rubio-Gómez, "Recovery capacity of electroconductive bituminous mortars under the influence of magnetic fields," *Mater. Des.*, p. under review, 2020.
- [6] P. Leiva-Padilla, F. Moreno-Navarro, G. Iglesias, M. C. Rubio-Gómez, and M. C. Rubio-Gamez, "Interpretation of the Magnetic Field Signals Emitted by Encoded Asphalt Pavement Materials," *Sustainability*, vol. 12, no. 7300, 2020, doi: 10.3390/SU12187300.
- [7] "Sustainable Multifunctional Automated and Resilient Transport Infrastructures, European Training Network," *Programa Europeo Horizonte 2020, financiado por acciones Marie Skłodowska-Curie para investigación, desarrollo tecnológico y demostración, beca No.721493.*, 2017. <http://www.smartietn.eu/> (accessed Sep. 08, 2020).
- [8] P. Leiva-Padilla, "Materiales asfálticos mecanomutables para la construcción de pavimentos inteligentes," Universidad de Granada, 2020.
- [9] P. Leiva-Padilla, F. Moreno-Navarro, G. R. Iglesias, and M. C. Rubio-Gómez, "Analysis of the mechanical response of asphalt materials manufactured with metallic fibres under the effect of magnetic fields," *Smart Mater. Struct.*, 2019.
- [10] P. Leiva-Padilla, F. Moreno-Navarro, G. Iglesias, and M. C. Rubio-Gómez, "Thermal characterization of electroconductive layers for anti-icing and de-snowing applications on roads (pendiente de publicación)," *Road Mater. Pavement Des.*, 2020.
- [11] P. Leiva-Padilla, F. Moreno-Navarro, G. Iglesias-Salto, and M. C. Rubio-Gamez, "Recovery capacity of electroconductive asphalt mortars under the influence of magnetic fields," *Mater. Today Commun.*, vol. 25, p. 101527, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101527>.

Anexo: Publicaciones científicas

Como soporte a la información presentada en esta propuesta, se recomienda la consulta de los siguientes documentos, que han sido producto del desarrollo de esta investigación:

- Artículos de investigación:
 1. P. Leiva-Padilla, F. Moreno-Navarro, G. R. Iglesias, y M. C. Rubio-Gómez, «Analysis of the mechanical response of asphalt materials manufactured with metallic fibres under the effect of magnetic fields», *Smart Mater. Struct.*, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab5762>
 2. P. Leiva-Padilla, F. Moreno-Navarro, y G. Iglesias, «A Review of the Contribution of Mechanomutable Asphalt Materials Towards Addressing the Upcoming Challenges of Asphalt Pavements», *Infrastructures*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures5030023>
 3. P. Leiva-Padilla, F. Moreno-Navarro, G. Iglesias-Salto, y M. C. Rubio-Gamez, «Recovery capacity of electroconductive asphalt mortars under the influence of magnetic fields», *Mater. Today Commun.*, vol. 25, p. 101527, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101527>
 4. P. Leiva-Padilla, F. Moreno-Navarro, G. Iglesias, y M. C. Rubio-Gómez, «Interpretation of the Magnetic Field Signals Emitted by Encoded Asphalt Pavement Materials», *Sustainability*, n.o 7300, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12187300>