

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

TRABAJO FIN DE MASTER

ESTUDIO DE PAVIMENTOS CON POSIBILIDADES DE RECARGA DE COCHES ELÉCTRICOS



Estudiante: Herrero Gutiérrez, Urko>

Director/Directora: Santamaría León, Amaia

Curso: 2022-2023

Fecha: Bilbao, 18, septiembre, 2023

RESUMEN

El crecimiento de la movilidad eléctrica ha generado una demanda creciente de puntos de recarga accesibles y eficientes en áreas urbanas y carreteras. En este sentido, los pavimentos para recarga de vehículos eléctricos, también llamados eRoad, ofrecen una oportunidad para integrar la infraestructura de carga de vehículos eléctricos de manera discreta y eficaz, minimizando la necesidad de estructuras de carga independientes. A lo largo de este estudio, se abordan tanto las características más generales de estas carreteras, como algunos de los desafíos técnicos de esta integración, tomando, en la medida de lo posible, referencias de estudios con datos reales de simulaciones y análisis experimentales.

ABSTRACT

The growth of electric mobility has generated an increasing demand for accessible and efficient charging points in urban areas and roads. In this sense, electric vehicle charging pavements, also called eRoads, offer an opportunity to integrate electric vehicle charging infrastructure in an unobtrusive and efficient manner, minimizing the need for separate charging structures. Throughout this study, we address both the more general characteristics of these roads, as well as some of the technical challenges of this integration, taking, as far as possible, references from studies with real data from simulations and experimental analysis.

LABURPENA

Mugikortasun elektrikoaren hazkundeak gero eta karga-puntu irisgarri eta eraginkor gehiago eskatzen ditu hiriguneetan eta errepideetan. Alde horretatik, ibilgailu elektrikoak kargatzeko errepideak, eRoad izenekoek, ibilgailu elektrikoak kargatzeko azpiegitura modu diskretu eta eraginkorrean integratzeko aukera ematen dute, karga-egitura independenteen beharra minimizatuz. Ikerketa honetan zehar, errepide horien ezaugarri orokorrenetatik, integrazioaren erronka teknikoetara helduko da, eta, ahal den neurrian, simulazioen eta analisi esperimentalen datu errealak dituzten azterketen erreferentziak hartuko dira.



CONTENIDO

RESUMEN	2
ABSTRACT	2
LABURPENA	2
1 INTRODUCCIÓN	5
2 OBJETIVOS	6
3 ALCANCE	7
4 BENEFICIOS	8
5 LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS Y SUS MÉTODOS DE CARGA	9
5.1 CAMBIO DE BATERÍA	9
5.2 CARGA CONDUCTIVA	9
5.3 CARGA SIN CONTACTO	11
6 LAS EROAD	13
6.1 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO	14
6.2 INTEGRACIÓN DEL SISTEMA DE CARGA	14
7 COMPORTAMIENTO TÉRMICO	17
7.1 GENERALIDADES	17
7.2 RESULTADOS DE DIFERENTES ESTUDIOS	19
7.2.1 Estudio 1: Ensayos realizados en Nueva Zelanda	19
7.2.2 Estudio 2: Ensayos realizados por el proyecto INCIT-EV	23
7.2.3 Estudio 3: Estudio del comportamiento térmico realizado por Talita de Freitas Alves	26
7.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS	33
8 COMPORTAMIENTO MECÁNICO	36
8.1 GENERALIDADES	36
8.2 RESULTADOS DE DIFERENTES ESTUDIOS	38
8.2.1 Estudio 4: Ensayos realizados por el proyecto INCIT-EV	38
8.2.2 Estudio 5: Ensayos realizados por A. Chabot and P. Deep	42
8.2.3 Estudio 6: Análisis del agrietamiento por fatiga	45
8.2.4 Estudio 7: Estudio del comportamiento mecánico realizado por Talita de Freitas Alves	47
8.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS	57



9	EFICIENCIA DEL SISTEMA DE CARGA	60
9.1	GENERALIDADES	60
9.2	RESULTADOS DE DIFERENTES ESTUDIOS	60
9.2.1	Estudio 8: Ensayos realizados por el proyecto FABRIC	60
9.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS	63
10	METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	65
11	CONCLUSIONES	66
12	FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO	67
13	BIBLIOGRAFÍA.....	68

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la movilidad eléctrica se presenta como una de las soluciones más prometedoras para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y avanzar hacia un modelo de transporte más sostenible y eficiente. Sin embargo, uno de los principales desafíos a los que se enfrenta esta tecnología es la infraestructura de recarga, que debe ser capaz de suministrar energía eléctrica de manera rápida y eficiente, adaptándose a las necesidades y hábitos de los usuarios.

En este contexto, las carreteras para recarga de coches eléctricos se presentan como una solución innovadora, que permite la recarga de los vehículos mientras se circula por la carretera o se estaciona en un lugar específico. Estos pavimentos combinan la funcionalidad de una superficie de circulación con la capacidad de suministrar energía eléctrica a los vehículos, lo que puede contribuir a reducir los tiempos de recarga y mejorar la autonomía de los vehículos eléctricos.

En este trabajo se abordará el estado del arte de la recarga de vehículos eléctricos, se mostrarán las distintas tecnologías disponibles para la recarga en movimiento y se profundizará en las carreteras para recarga de coches eléctricos, destacando aspectos como las características principales. Además, se evaluarán diferentes proyectos y estudios para aportar datos y ejemplos de este tipo de estructuras y comprender los diferentes aspectos que influyen en su diseño y como se pueden controlar.

En definitiva, este trabajo busca contribuir al desarrollo de infraestructuras de recarga más eficientes y sostenibles, que permitan impulsar la transición hacia un modelo de transporte más limpio y respetuoso con el medio ambiente.

2 OBJETIVOS

En el desarrollo de cualquier proyecto, es esencial establecer objetivos claros que no solo orienten su desarrollo, sino que también definan el propósito y la relevancia del mismo. En este contexto, el objetivo principal de este Trabajo Final de Máster es el estudio de pavimentos con posibilidades de recarga de coches eléctricos, De cara a su relevancia, esta viene definida por el crecimiento exponencial de la movilidad eléctrica, donde la creación de infraestructuras viales adaptadas a esta tecnología se ha convertido en una prioridad.

Además del objetivo central, es crucial comprender el panorama actual de los vehículos eléctricos y los diversos métodos de recarga disponibles. Es por ello, que se hará hincapié en analizar los aspectos correspondientes al estado del arte de los vehículos eléctricos.

Del mismo modo, se tiene también como objetivo secundario profundizar en la comprensión del funcionamiento de las carreteras diseñadas para la recarga de vehículos eléctricos y su integración en las carreteras convencionales. Esto implica investigar las características de ambos tipos de estructuras y entender las similitudes y diferencias que pueden llegar a tener.

El último objetivo secundario es el análisis exhaustivo de diferentes estudios relacionados con este tipo de estructuras viales, con el fin de identificar los aspectos clave que deben considerarse en su diseño y construcción. Se busca dar especial importancia al impacto que los diferentes materiales tienen en este tipo de estructuras.

A través de la investigación de los objetivos mencionados, se busca contribuir al crecimiento y la mejora de la infraestructura necesaria para promover la movilidad eléctrica y, en última instancia, impulsar un futuro más sostenible y limpio en el transporte por carretera.

3 ALCANCE

La importancia de definir el alcance de un proyecto radica en su capacidad para establecer límites y fronteras claras, proporcionando así una hoja de ruta fundamental para su ejecución. Este proceso de delimitación no solo ayuda a prevenir desviaciones no deseadas, sino que también es esencial para gestionar eficientemente los recursos y el tiempo disponibles. Al establecer con precisión lo que el proyecto incluye y excluye, se reducen los riesgos de malentendidos, conflictos y cambios inesperados, lo que, a su vez, simplifica la toma de decisiones.

Además, la definición del alcance ofrece una base sólida para evaluar el progreso y el éxito del proyecto, lo que permite a los integrantes mantener un enfoque claro de los resultados deseados. De forma breve, la delimitación adecuada del alcance es un cimiento esencial para el éxito y la gestión efectiva de cualquier proyecto.

Para el caso de este Trabajo Final de Máster, el proyecto se define como un estudio exhaustivo y analítico enfocado en el desarrollo de carreteras con capacidad de recarga de vehículos eléctricos. Es importante subrayar que el alcance de este proyecto se limita específicamente a la investigación y análisis de datos y estudios existentes en el campo de las infraestructuras viales para la movilidad eléctrica. Por ello, no se plantea ninguna actividad relacionada con el diseño o la ejecución de proyectos físicos ni se realizan cálculos técnicos o de ingeniería.

No obstante, se prevé llegar a comprender los aspectos fundamentales que influyen en el diseño de este tipo de estructuras, dando especial importancia a los materiales que se usan en su construcción y a como estos afectan en su comportamiento.

4 BENEFICIOS

Los beneficios que un proyecto aporta no solo son indicadores clave para evaluar su éxito, sino que también desempeñan un papel esencial en la promoción del desarrollo sostenible y la mejora de la calidad de vida de las comunidades. Considerar y comprender estos beneficios no solo enriquece la toma de decisiones, sino que también brinda una visión integral de las implicaciones de cualquier iniciativa.

De cara al proyecto presentado en este documento, centrado en las carreteras para recarga de vehículos eléctricos, es importante destacar los beneficios sustanciales que surgen de la movilidad eléctrica, especialmente en relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 7, 11 y 13 de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas.

En relación al ODS 7, el cual se refiere a Energía Asequible y No Contaminante, fomentar el uso de vehículos eléctricos y desarrollar infraestructuras viales para su recarga tiene un impacto directo sobre él, ya que promueve la adopción de energía eléctrica limpia y sostenible en el transporte. Esto se traduce en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la mejora de la calidad del aire, creando un entorno más saludable para las comunidades y promoviendo un futuro energético más sostenible.

Haciendo referencia al ODS 11, donde se promueven Ciudades y Comunidades Sostenibles, los aspectos tratados en este proyecto apuntan hacia la reducción de la contaminación del aire y el ruido. De este modo, se contribuye a mejorar la calidad de vida en áreas urbanas, al tiempo que se fomenta un transporte más limpio y eficiente. Estas iniciativas pueden también ayudar a aliviar la congestión del tráfico y reducir la huella ecológica de las ciudades, promoviendo un entorno urbano más habitable y sostenible.

Finalmente, el ODS 13 busca la Acción por el Clima, donde el uso de vehículos eléctricos y la expansión de la infraestructura de recarga representan medidas concretas en la lucha contra el cambio climático. Al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector del transporte, estas acciones contribuyen directamente a la mitigación de los impactos climáticos y al logro de los objetivos de reducción de carbono a nivel global.

5 LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS Y SUS MÉTODOS DE CARGA

En los últimos años, los vehículos eléctricos (EV por sus siglas en inglés) han experimentado un aumento significativo en su popularidad y desarrollo, impulsados por la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y la dependencia de los combustibles fósiles. Todo ello, los ha llevado a competir contra los medios de transporte más tradicionales, como los son los vehículos de gasolina o diésel, ante los que aportan principalmente una menor repercusión medioambiental. [1]

No obstante, pese a los beneficios que aportan, siguen estando presentes desafíos como una menor autonomía comparado a los vehículos convencionales y la necesidad de una infraestructura de carga adecuada. Estos desafíos llevan a la búsqueda de métodos de carga que se adecuen a las diferentes situaciones y necesidades de los usuarios de EV, promoviendo así su uso. Actualmente, los principales métodos de carga que se pueden encontrar son el cambio de batería, la carga conductiva y la carga sin contacto. [1]

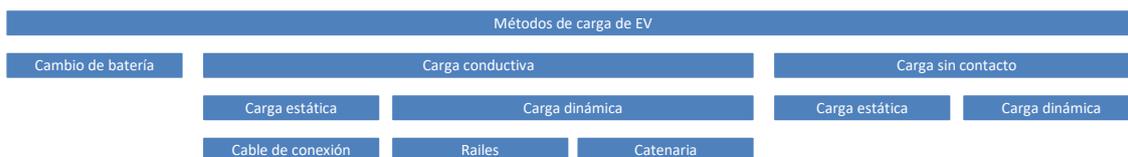


Fig. 1. Sistemas de carga de EV.

5.1 CAMBIO DE BATERÍA

Es un método de alquiler en el que se retira la batería agotada y se instala una nueva completamente cargada. El propietario de la estación de cambio de batería realiza cargas lentas para prolongar la vida útil de las baterías, por lo que, aunque es un método muy eficiente para los usuarios, el coste suele ser mayor. Además, tiene otros inconvenientes como la gran inversión en equipamientos y baterías que es necesaria por parte del propietario de la estación, así como la posibilidad de que no todos los EV sean compatibles con el modelo de batería que se suministra. [1]

5.2 CARGA CONDUCTIVA

De cara a la carga conductiva, se basa en la transmisión de la energía eléctrica desde el punto de suministro hasta el EV mediante un elemento conductor y a día de hoy es la más habitual. Entre sus beneficios cabe destacar una mayor viabilidad económica, posibilidades de carga rápida, sencillez de uso y eficiencia elevada. [1]

Entre los sistemas de carga conductiva los más comunes de ver son los sistemas estáticos, es decir, aquellos que son similares a los de una gasolinera convencional. En este caso, el usuario llega con su vehículo a la estación, donde tras haberse detenido recarga la batería del EV con ayuda de un cable de carga. De cara al tipo de carga, depende en gran medida del vehículo y de los estándares de la batería que use, siendo así que puede ser necesario encontrar estaciones de carga rápida o lenta dependiendo de las necesidades. No obstante, esto no supone un problema ya que existen estaciones de carga en prácticamente cualquier lugar, desde hogares y oficinas, hasta estacionamientos y estaciones de servicio. [1]

Otro sistema menos habitual, pero no menos interesante, es la recarga dinámica mediante el contacto directo de los elementos de carga, siendo esta uno de los tipos de carretera electrificadas que actualmente están en proceso desarrollo. Entre ellas, la idea más consolidada es el uso de vehículos pesados equipados con pantógrafos, similares a los que usan transportes como el metro o el tranvía, que los habilitan a recibir corriente eléctrica de un sistema de catenarias (véase Fig. 2.). [2]



Fig. 2. Sistema de recarga mediante catenaria. [2] y [3] respectivamente.

Algunas desventajas de esta tecnología son su limitación en términos de interoperabilidad entre el transporte de pasajeros y mercancías, la notoria contaminación visual y los problemas de seguridad. Además, la norma europea para las líneas aéreas sitúa el cable de contacto a una altura de 5,5 metros, lo que impide que los vehículos más pequeños se conecten al sistema. Al mismo tiempo, su sistema de transmisión y distribución al aire libre requiere el desarrollo de tecnologías seguras e inteligentes para superar situaciones extremas de fallos transitorios, como lo puede ser el contacto con árboles debido al cableado caído. A pesar de esas objeciones, las líneas aéreas son la solución de carretera electrificada menos invasiva respecto a la estructura del pavimento, siendo además la que cuenta con mayor variedad de proveedores tecnológicos en el mercado y con procesos de implantación/explotación ya regulados. [3]

En esa misma línea, existe un método parecido donde se utilizan railes electrificados integrados en el pavimento y vehículos con unidades de captación incorporados (véase Fig. 3.), pero es, al igual que el método anteriormente explicado, una tecnología que está dando sus primeros pasos todavía. [2]

De cara a su funcionamiento, la unidad instalada en el vehículo consiste en un brazo mecánico o en un pantógrafo invertido acoplado al motor del vehículo. Este dispositivo se extiende y se retrae para entrar en contacto con un módulo, conteniendo este los carriles alineados y donde solo se electrifican los tramos por los que circula el vehículo para garantizar la seguridad. Esta tecnología se basa en aplicaciones similares que han tenido éxito en metros, tranvías e instalaciones de tranvías, donde un "tercer carril" situado entre los carriles de tracción proporciona suministro eléctrico, desempeñando un papel similar al de la catenaria en las líneas aéreas. [3]



Fig. 3. Sistema de recarga mediante railes. [2] y [3] respectivamente.

5.3 CARGA SIN CONTACTO

De forma general, la tecnología de carga sin contacto puede definirse como la transmisión de energía eléctrica entre dos puntos sin necesidad de medios físicos. En los últimos años, esta tecnología ha sufrido grandes avances y su aplicación en los EV está cada vez más presente, permitiendo una carga más cómoda y siendo, como apuntan diversos artículos, [1] y [4], más práctica y segura que la carga conductiva. No obstante, es un método en desarrollo que se enfrenta a diferentes desafíos y que actualmente no dispone de la mejor eficiencia.

Las tecnologías de carga sin contacto son varias, pero la principal y actualmente más estudiada es la transferencia inductiva de potencia o IPT por sus siglas en inglés. Su aplicación es quizás más conocida en sistemas de carga de teléfonos, donde, sin necesidad de cables, una plataforma transfiere energía al móvil. Su principio de funcionamiento se basa en la inducción electromagnética, más concretamente, en la transmisión de energía eléctrica entre dos bobinas, actuando una de emisora y otra de receptora. [4]

La aplicación de esta tecnología en los EV, proporciona la posibilidad de recargas sin contacto que pueden darse de manera estacionaria o dinámica, siendo esta última otro de los tipos de carreteras electrificadas que actualmente están en desarrollo. Como ejemplo, se muestra en la Fig. 4 el On-line Electrical Vehicle (OLEV) diseñado por el Korean Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), que ha conseguido de forma poco invasiva un sistema que permite la carga de vehículos pesados como los autobuses de transporte público. [3]



Fig. 4. On-line Electrical Vehicle (OLEV). [3]

De forma general, la carga IPT aplicada a las carreteras electrificadas abre un abanico de posibilidades y es quizás el método de carga con más proyección de futuro para este tipo de vehículos, creando un medio más accesible para los usuarios.

6 LAS EROAD

La carretera electrificada o también llamada eRoad es una infraestructura de transporte que, a diferencia de las carreteras tradicionales (tRoad), permite cargar vehículos eléctricos en movimiento y de forma más cómoda. No obstante, sigue buscando cumplir las funciones básicas de una carretera convencional, ya que su objetivo es servir de vía de transporte tanto a vehículos eléctricos como a los más tradicionales.

Estas estructuras podrían reducir uno de los grandes inconvenientes de los EV, es decir, el alto coste que llegan a tener sus baterías y que hace que este tipo de vehículos dejen de ser competitivos frente a los más tradicionales, sobre todo si se habla de autonomía. Esto se refleja en la Fig. 5, donde se muestran los resultados de un estudio realizado en Dinamarca, que comprobó que la diferencia entre los costes de vehículos tradicionales y EV dependía principalmente de las baterías. [5]

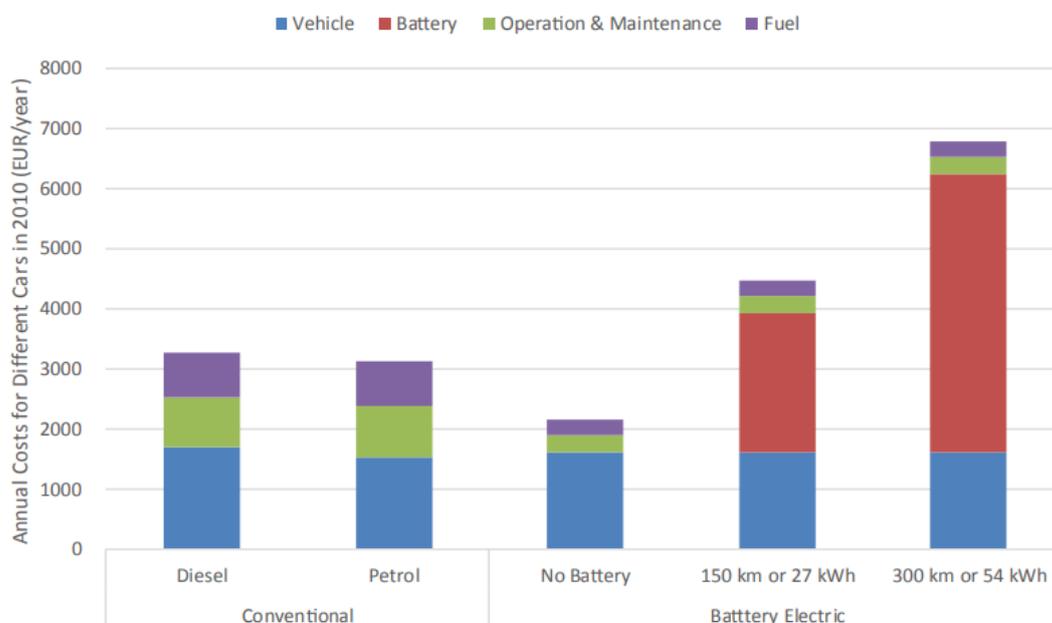


Fig. 5. Comparativa de costes entre diferentes métodos de transporte. [5]

De los métodos ya mencionados en el anterior apartado en lo referido a carreteras electrificadas, es la carga ITP la que promete ser la principal herramienta. La idea, en este caso, es crear infraestructuras que permitan suministrar energía eléctrica sin contacto, permitiendo que los EV recorran distancias más largas y habilitando una carga más accesible.

El estudio llevado a cabo en este documento, donde se busca analizar los pavimentos para recarga de coches eléctricos, se centrará en este tipo de eRoad. Esto se debe al desarrollo que tienen en la actualidad y a, como se verá a lo largo del documento, el gran papel que juegan las características del pavimento y los materiales en este tipo de estructuras.

6.1 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

Una eRoad con un sistema IPT típico, como el mostrado en la Fig. 4, suele constar de un dispositivo de a bordo instalado bajo el chasis del vehículo y un dispositivo de suministro de energía incrustado en la calzada. [4]

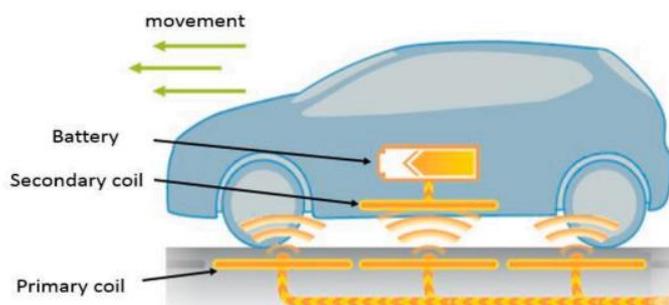


Fig. 6. Sistema IPT simplificado. [6]

La parte del dispositivo IPT introducido en el pavimento, ver Fig. 6, debe integrarse sucesivamente a lo largo del sentido de la marcha del vehículo y consta principalmente de tres partes: [4]

- La fuente de alimentación que proporciona una tensión de salida de corriente continua convenientemente regulada a través de un rectificador.
- Un convertidor para proporcionar altas frecuencias de salida, combinado con capacitancia para lograr resonancia con el transmisor y reducir así la pérdida del convertidor.
- Un transmisor acoplado mutuamente con el dispositivo de captación, compuesto principalmente por bobinas conductoras (las ya mencionadas bobinas emisoras), núcleos de ferrita y una placa de apoyo.

6.2 INTEGRACIÓN DEL SISTEMA DE CARGA

Llevar a cabo la integración de estos sistemas de carga es algo complejo y que requiere analizar tanto el propio sistema como la estructura del pavimento en el que se integrará. Por ello, en este apartado se explicarán primero algunos conceptos sobre pavimentos y se pasará después a mostrar las diferentes formas de integración de estos sistemas.

Los pavimentos pueden disponer de diferentes estructuras y diseños, pero en general suelen tener una estructura flexible, como la mostrada en la Fig. 7, que se compone de múltiples capas, que varían en términos de espesor, función, composición del material y propiedades.

La superficie de rodadura es el elemento visible para los usuarios y constituye la capa en contacto directo con el tráfico y las condiciones climáticas. En los pavimentos flexibles, la capa de rodadura está compuesta generalmente por mezclas bituminosas, mientras que en los pavimentos rígidos suele ser más común ver

losas u hormigón armado continuo. No obstante, sea cual sea su tipología, la capa de rodadura debe cumplir requisitos particulares en términos de confort de rodadura, seguridad, drenaje y durabilidad. [3]

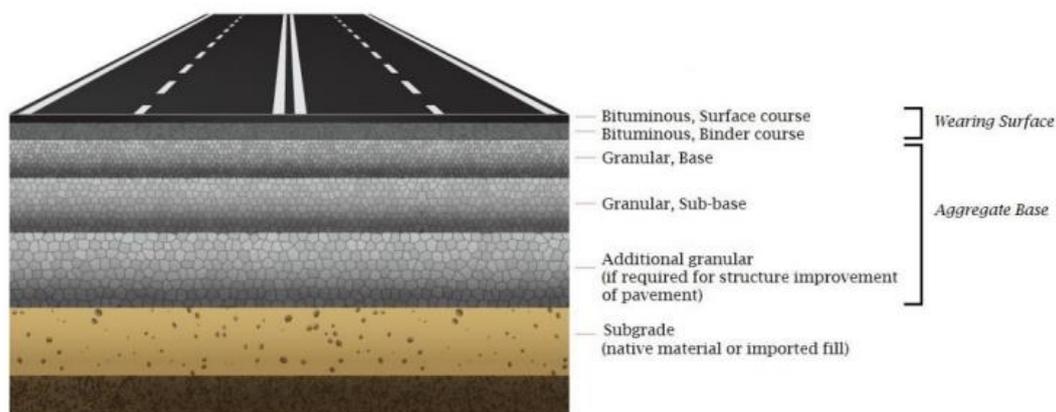


Fig. 7. Ejemplo de estructura del pavimento. [3]

Debajo de la superficie de rodadura hay una base de áridos, normalmente granular, que es la encargada de proporcionar el espesor que garantiza la calidad del pavimento a lo largo de su vida útil y de soportar cargas importantes durante el periodo de construcción. Tradicionalmente, la base se diseña con áridos gruesos en las capas inferiores y partículas más pequeñas en las capas superiores. No obstante, la composición y el grosor de las capas se eligen en función de muchas variables, como el nivel del tráfico, la dureza de los áridos y la limpieza de la arena y la grava. También es importante recordar que las capas de base y subbase pueden variar significativamente de la capa de rodadura en aspectos como la permeabilidad, ya que cada capa acaba teniendo una función particular. [3]

El terreno es la capa que más varía dentro de la extensión de una carretera en cuanto a composición y comportamiento mecánico. El papel principal de esta capa es soportar las cargas sin desarrollar asentamientos excesivos y reducir la magnitud de la tensión vertical que alcanza la parte superior de la capa para que no se produzcan deformaciones permanentes. En general, la capacidad portante del terreno es un dato importante a la hora de definir los materiales y espesores de las capas superiores. [3]

De cara a los daños estructurales típicos de este tipo de estructuras, la gran variabilidad del firme y las diferentes composiciones llevan a la aparición de problemas como el agrietamiento por fatiga, las roderas debidas a la deformación permanente y el agrietamiento térmico en regiones con variaciones significativas de temperatura o temperaturas muy frías. Por ello, el diseño de pavimentos duraderos es generalmente una tarea complicada. [3]

A la hora de adaptar una tRoad a una eRoad, es sobre todo en la superficie de rodadura donde se incrustan los componentes de suministro de energía. Por lo tanto, el diseño de una eRoad debe seguir métodos precisos para cumplir los elevados estándares de calidad adoptados también para las tRoads, al tiempo

que debe integrar los efectos del tráfico y las cargas ambientales en la respuesta de los nuevos componentes del pavimento. [6]

En los últimos años, se han investigado activamente diferentes tecnologías de construcción para integrar las instalaciones de carga inductiva en las estructuras físicas del pavimento de forma adecuada, que pueden clasificarse en dos categorías principales: [6]

- Método de construcción basado en la prefabricación. Las unidades de carga (UC) son módulos construidos en fábrica con materiales rígidos, como el hormigón, que luego se empotran in situ en un periodo relativamente corto.
- Método de construcción in situ. Todos los componentes se instalan in situ, es decir, las instalaciones IPT se fijan en un pavimento excavado como una estructura esquelética, que luego se sella con material adicional de hormigón.

Para ambos métodos, la integración puede realizarse mediante la ejecución de una zanja sobre una estructura viaria existente o mediante la sustitución del carril completo, donde generalmente las unidades de carga se instalan en el centro del carril de circulación. En función del espesor de la capa de rodadura existente y de la tecnología de carga que se vaya a utilizar, la profundidad de la zanja puede alcanzar las capas de base y subbase del pavimento. [3]

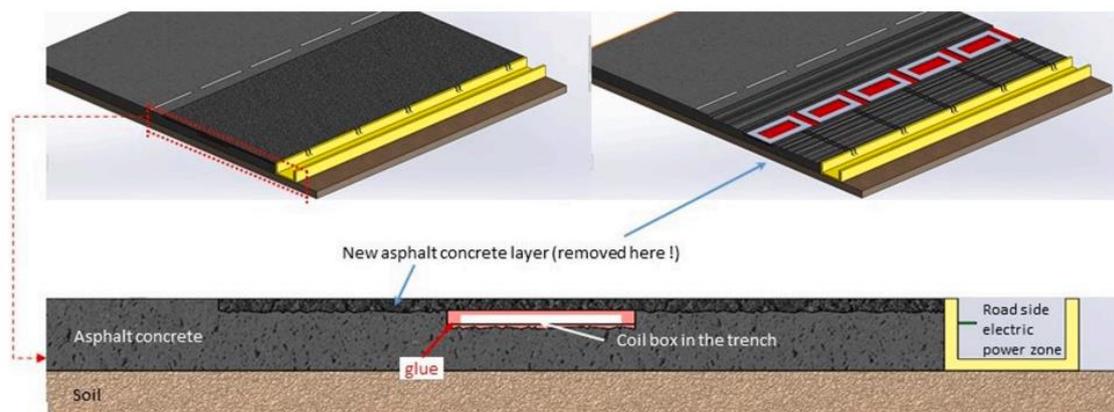


Fig. 8. Propuesta del proyecto INCIT-EV. [2]

No obstante, en cualquiera de los casos, es importante que la integración no influya negativamente en el rendimiento de los componentes individuales o, dicho de otro modo, la eRoad debe cumplir los requisitos de rendimiento para servir como una carretera normal por la que circular, así como para suministrar energía eléctrica de manera eficiente a los vehículos eléctricos. [6]

Estos aspectos, hacen que el diseño y ejecución de una estructura de este tipo dependa de un equipo multidisciplinar que sea capaz de contemplar los diversos aspectos que influyen en su creación y correcto funcionamiento. Por ello, diferentes estudios, [2] y [4], apuntan a que la integración del sistema IPT en las estructuras viarias supone un desafío, siendo necesario garantizar la compatibilidad entre los diferentes sistemas integrados en la carretera y los materiales del pavimento.

7 COMPORTAMIENTO TÉRMICO

En este apartado se presenta la importancia que el comportamiento térmico de la estructura y los materiales tienen sobre el diseño de las eRoad, dando una breve explicación general, seguida de datos de diferentes estudios y finalmente el análisis de los mismos.

7.1 GENERALIDADES

El comportamiento térmico de los materiales que forman la estructura es uno de los mayores puntos de análisis ante la integración de un sistema IPT en carreteras, siendo la compatibilidad térmica entre materiales el principal desafío. Además, en la mayoría de los casos, se busca aprovechar carreteras ya existentes, que no fueron diseñadas para soportar el aumento de temperatura generado por este tipo de sistemas de carga, existiendo así ocasiones donde los materiales no dispongan de las características térmicas adecuadas.

El calor generado por las bobinas es la principal carga térmica que deben soportar tanto los elementos que forman el sistema de carga, como el propio pavimento y estructura de la carretera. El causante de esto es la disipación de calor generada por efecto Joule en el interior de la bobina emisora, que, aunque disponga de componentes que soporten las altas temperaturas que pueda llegar a generar, no evitan que parte del calor se transmita hacia el resto de la carretera. [2]

Del mismo modo, la carga térmica no solo viene dada por el funcionamiento de las bobinas, si no que se ve directamente afectada por las condiciones meteorológicas y flujos de calor con el entorno. Estos intercambios se dan principalmente en las capas superiores del pavimento mediante la radiación solar y transferencia de calor por convección del viento. [2]

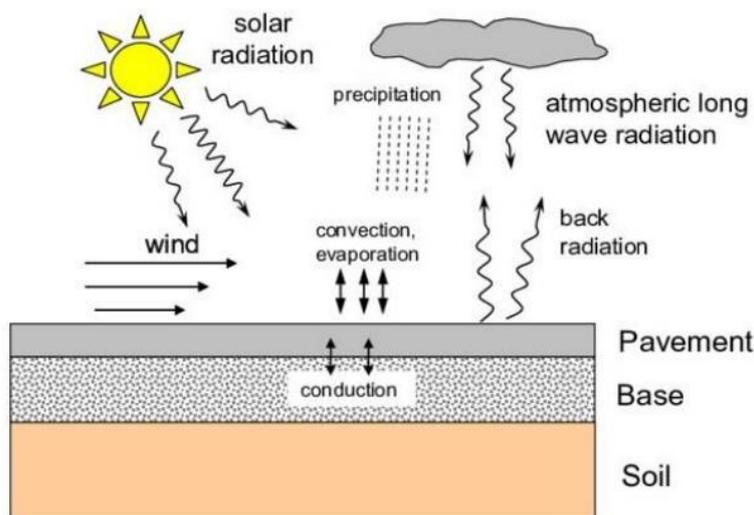


Fig. 9. Flujos de calor del pavimento con el entorno. [3]

Las temperaturas en el nivel superficial tienden a aumentar durante el día y a disminuir durante la noche, aunque en un momento dado depende de las temperaturas anteriores (historial de carga térmica) y de la posición en la que se realiza la medición (gradiente térmico entre la superficie y el subsuelo). [3]

La mayoría de las metodologías de análisis del comportamiento térmico de los pavimentos apuntan a la gran importancia que tiene la variación de la temperatura en las capas asfálticas. Normalmente, la variación de temperatura a lo largo de un año completo se divide en varios períodos y, para cada uno de ellos, se muestra un conjunto de propiedades de los materiales en función de un valor de temperatura de referencia definido como representativo del período/estación. En resumen, la temperatura se tiene en cuenta en el diseño del firme mediante la definición de una temperatura constante equivalente, que produce los mismos daños anuales que las variaciones estacionales de temperatura bajo el mismo nivel de tráfico. A modo de ejemplo: en Francia continental esta temperatura equivalente se fija en 15°C, mientras que para los territorios de ultramar se adoptan temperaturas equivalentes más elevadas. [3]

La variación térmica a lo largo de los pavimentos es responsable de diferentes fenómenos. En algunos tipos de pavimento, la variación de temperatura es causante de los procesos de apertura y cierre de grietas de retracción. En otros casos, como en el caso de los pavimentos rígidos, los gradientes térmicos producidos por la temperatura a lo largo del tiempo y la profundidad provocan tensiones de flexión en las losas de hormigón. Por su parte, en los pavimentos flexibles, la temperatura afecta principalmente a la respuesta viscoelástica de las mezclas asfálticas y genera tensiones dentro del material debido a la limitación de la expansión y contracción térmica. [3]

Estos comportamientos llevan a la aparición de daños en la estructura, donde los más comunes son el agrietamiento por baja temperatura y por fatiga térmica. Es decir, a temperaturas muy bajas, la contracción del material asfáltico genera una tensión de tracción que puede provocar fisuras si supera la resistencia última del material. En el agrietamiento por fatiga térmica, no se requieren bajas temperaturas para que se produzca, sino que el factor de control es el rango de temperatura y la acumulación de ciclos de carga. [3]

Ensayos llevados a cabo sobre el terreno han demostrado que la deformación inducida térmicamente es mayor que la deformación inducida por el tráfico, y que la fatiga térmica es más una consecuencia de la amplitud que de la frecuencia, al contrario que la fatiga inducida por el tráfico. La respuesta estructural del pavimento a la carga está fuertemente ligada a la temperatura, siendo así que a altas temperaturas la mezcla es más viscosa y más susceptible a la deformación permanente bajo esfuerzos de carga repetidos, mientras que a bajas temperaturas es más frágil y susceptible al agrietamiento térmico. [3]

Los ensayos de laboratorio, por su parte, han avanzado en la recreación de diferentes condiciones climáticas, pero cuestiones prácticas como el uso de cámaras de temperatura controlada a temperaturas

constantes limitan la representación precisa del gradiente de temperatura a lo largo de la profundidad del pavimento. [3]

7.2 RESULTADOS DE DIFERENTES ESTUDIOS

7.2.1 Estudio 1: Ensayos realizados en Nueva Zelanda

Algunos análisis térmicos realizados en Nueva Zelanda a sistemas IPT [7], donde la superficie de los pavimentos ronda en verano los 50 °C, dejan ver las altas temperaturas a las que estos sistemas de carga pueden llegar.

7.2.1.1 Ensayos experimentales y simulaciones a pequeña escala

Los ensayos se realizaron partiendo de unos bloques de una mezcla de hormigón-betún de granulometría densa con un tamaño máximo nominal de árido de 14 mm y que tras compactarse rondaba el 4% de huecos de aire. Por su parte, la bobina emisora (Emulador IPT pad) se simuló mediante una caja de polietileno, en la que se introdujeron resistencias para representar la carga térmica, que se integró en un bloque de asfalto compactado, usando como material de unión un aglomerante sintético de gran resistencia al cambio de fase ante altas temperaturas. Las principales propiedades térmicas de estos materiales pueden verse en la siguiente tabla.

Principales propiedades térmicas			
Función	Material	Densidad (kgm ⁻³)	Conductividad térmica (Wm ⁻¹ °K ⁻¹)
Capa	Mezcla hormigón-betún	2422	1,3
Bloque de la bobina	Polietileno	1400	0,25
Sellado	Poliuretano	1690	0,91

Tabla. 1. Principales propiedades térmicas. [7]

El esquema de la estructura es el mostrado en la Fig. 10, donde se pueden observar los diferentes sensores térmicos ubicados en la superficie de la caja de la bobina (FBG) y a lo largo del bloque de asfalto (T).

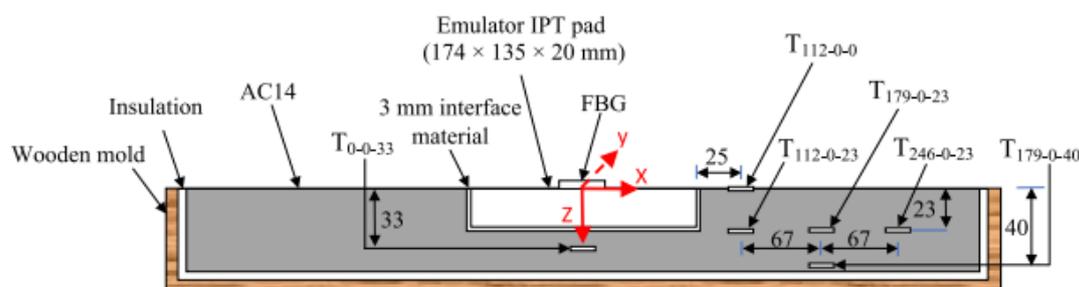


Fig. 10. Esquema del prototipo de ensayo. [7]

De estos primeros ensayos experimentales y simulaciones mediante elementos finitos se consiguieron resultados muy parecidos, dando valores en la superficie de la bobina de en torno a los 76 °C en temperaturas ambiente de 20 °C y 102 °C en temperaturas ambiente de 50 °C. Estos valores, junto a las temperaturas del resto de sensores, se pueden ver en la Fig. 11, que deja en evidencia la influencia que el entorno tiene sobre estos sistemas, haciendo que el aumento de temperatura no solo dependa del funcionamiento de las bobinas.

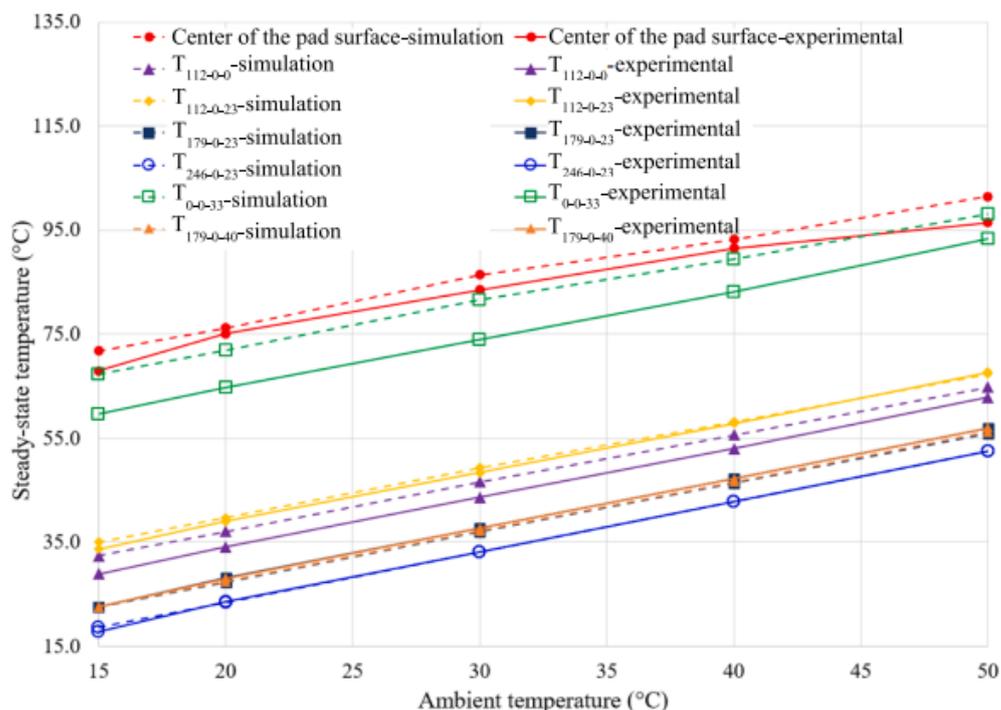


Fig. 11. Lecturas de los sensores a diferentes temperaturas ambiente. [7]

Del mismo modo, se aprecia como las temperaturas más altas se dan en la superficie de la bobina, aproximadamente 102 °C en temperaturas ambiente de 50 °C, seguidas de cerca por las registradas en el sensor situado debajo de la misma, cerca de los 95 °C en la misma temperatura ambiente. Por el contrario, puntos de registros como los T-112, quedan muy por debajo del T-0, con una diferencia constante de en torno a los 25 °C.

También se llevaron a cabo ensayos con diferentes conductividades térmicas de la mezcla de asfalto, donde se consiguió reducir la temperatura global aumentando el valor de esta propiedad como se puede ver en la Fig. 12. En ese sentido, los puntos de análisis más alejados, como lo pueden ser el T-179 o el T-246, sufrieron una variabilidad prácticamente nula, aunque aumentaron mínimamente su valor.

Otros puntos más cercanos al bloque de la bobina, registraron una gran bajada de la temperatura a medida que el valor de la conductividad aumentaba, siendo el punto de análisis bajo la bobina el que mayor reducción de temperatura registró. Mas concretamente, pasó de estar en torno a los 103 °C con

un valor de conductividad de $1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, a rondar los $83 \text{ }^\circ\text{C}$ para una conductividad de $3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. A estos datos le seguiría el sensor situado sobre la bobina, donde el aumento de la conductividad no tiene tanto impacto, pero si que lo lleva de los $103 \text{ }^\circ\text{C}$ a los $96 \text{ }^\circ\text{C}$.

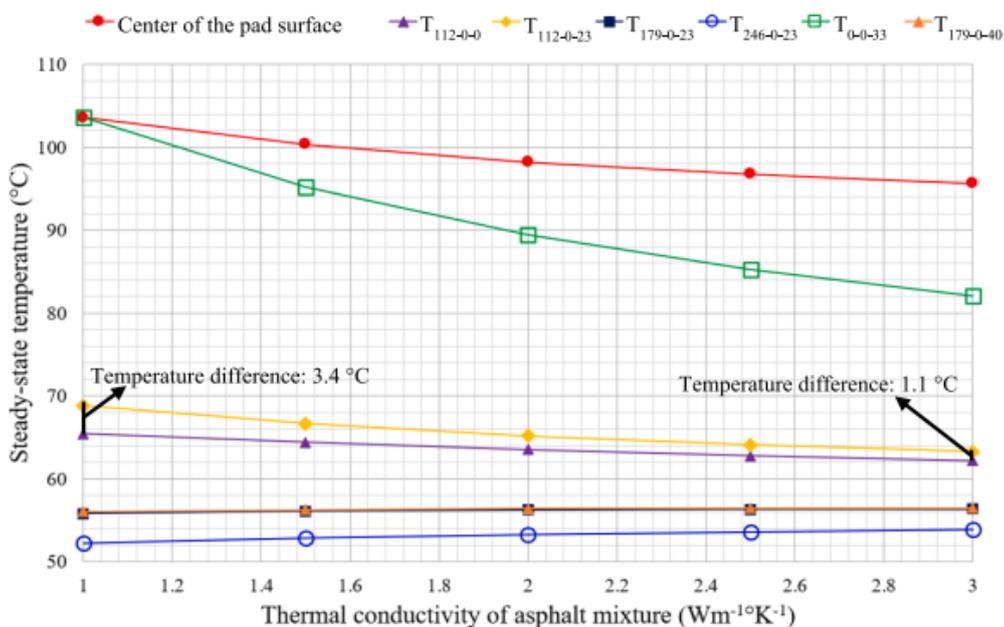


Fig. 12. Efecto de la conductividad térmica. [7]

7.2.1.2 Simulaciones a escala real

Los resultados mostrados anteriormente fueron medidos y numéricamente simulados en condiciones de laboratorio y con probetas a pequeña escala, no pudiendo ver las temperaturas máximas que se podrían llegar a dar en la realidad. Por ello, decidieron llevar a cabo el análisis conjunto de un sistema IPT y pavimento a escala realista, siguiendo el esquema de la Fig. 13.

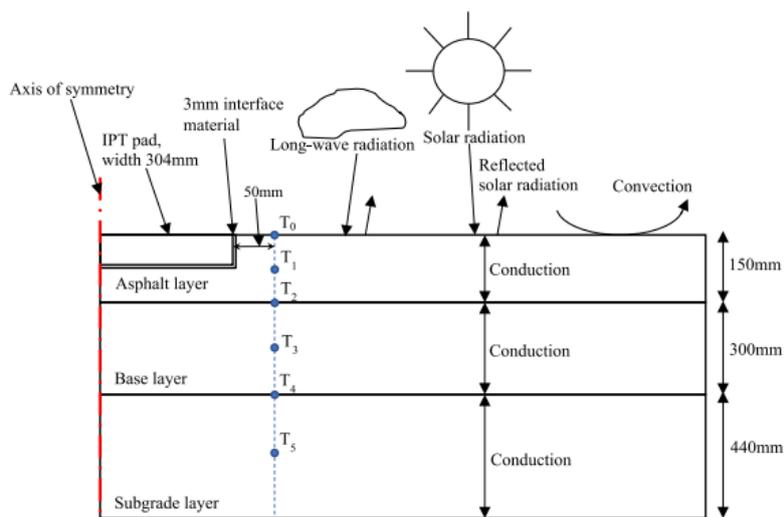


Fig. 13. Esquema de las simulaciones a escala real. [7]

La estructura analizada está constituida por una primera capa de asfalto ($e=150$ mm), una capa intermedia que hace las funciones de base ($e=300$ mm) y una última capa que representa el suelo ($e=440$ mm). En ella, más concretamente en la capa superior, se ha integrado una unidad de carga unida al pavimento mediante 3 mm de un material de enlace. Esta unidad se dimensionó tanto física como de cara a sus pérdidas basándose en un sistema SAE J2954 Standardised 11 kW System, cuyos datos ayudaron a llevar a cabo una simulación más realista.

De cara a las condiciones de contorno, la superficie superior del pavimento se modelizó para intercambiar calor mediante radiación solar, radiación de onda larga y transferencia de calor por convección. Para ello, se registraron datos en Nueva Zelanda, siendo considerados en la simulación momentos máximos de entorno a 1200 Wm^2 de radiación solar y 25 °C de temperatura del aire.

Este análisis se llevó a cabo mediante simulaciones térmicas con ANSYS Workbench y resultó en el campo de temperaturas mostrado en la Fig. 14. Como se puede observar, las temperaturas máximas del sistema se dan en la bobina, aproximadamente 82 °C , debido principalmente a la gran carga térmica que supone su funcionamiento. De cara al resto de la estructura, es la superficie la que mayor temperatura registra, siendo la zona de contacto con el entorno, y los valores se reducen a medida que aumenta la profundidad.

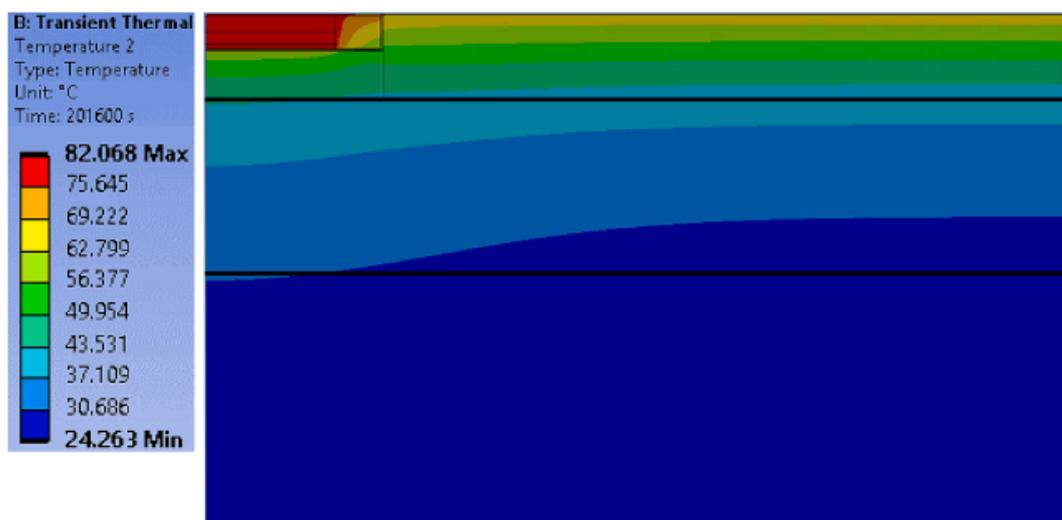


Fig. 14. Campo de temperaturas. [7]

Cabe destacar también como la variación del campo de temperatura tiene un cambio más uniforme a medida que aumenta la distancia respecto de la unidad de carga, llegando a un punto donde la distribución de temperatura vertical acaba siendo idéntica a lo largo de la estructura. Las zonas más cercanas a la unidad de carga, por su parte, acaban teniendo variaciones de temperatura vertical y horizontal debido a las irregularidades que genera la presencia del sistema de carga.

7.2.2 Estudio 2: Ensayos realizados por el proyecto INCIT-EV

INCIT-EV es un proyecto europeo que busca investigar diferentes sistemas de recarga de coches eléctricos, lo que ha hecho que las eRoad sean uno de sus principales objetivos. Por ello, han dedicado tiempo y esfuerzo a realizar ensayos y simulaciones de estos sistemas de carga y su integración, entre los que se pueden encontrar estudios del comportamiento térmico de estas estructuras, [2] y [6].

El diseño que presentó este proyecto para realizar estas simulaciones fue el mostrado en la Fig. 15, donde se dispone de una primera capa de mezcla de hormigón-betún de 50 mm, seguida de una capa de mezcla de grava-betún de 250 mm y por último se finaliza la estructura con una capa de 3000 mm de terreno. En la capa central, formada por la mezcla de grava y betún, se integra el bloque que contiene la bobina del sistema de carga, situándolo en una zanja y sellándolo en ella.

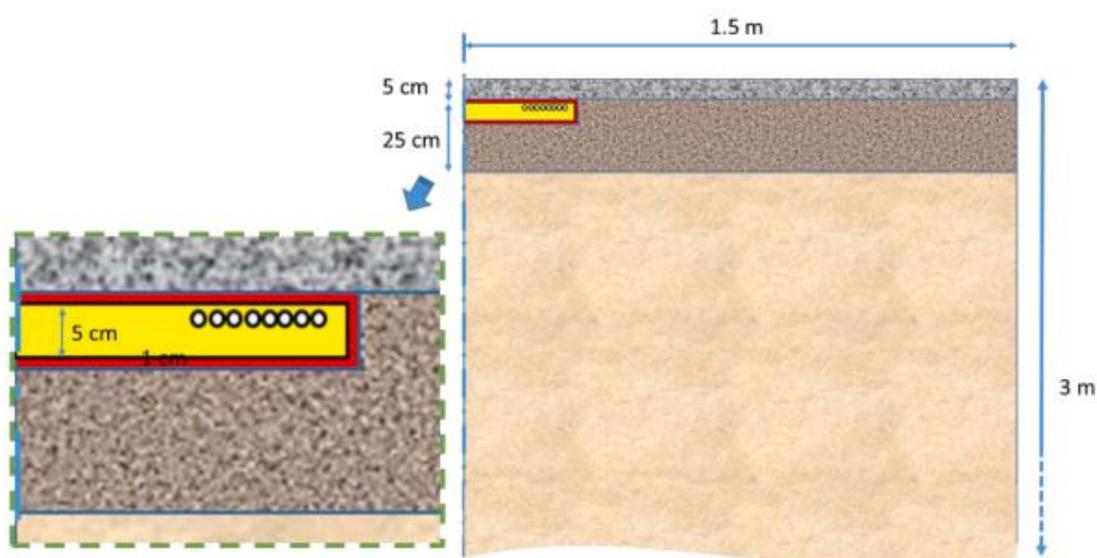


Fig. 15. Estructura del pavimento para ensayos de comportamiento térmico. [2]

Los análisis realizados buscaban analizar el comportamiento térmico de la estructura ante diferentes condiciones y materiales. Es por ello que, de cara al material del bloque de la bobina y del sellado de este, se planteó para ambos casos dos opciones, buscando ver los resultados que diferentes modificaciones podrían aportar. Esto llevo a analizar tres casos:

- Caso 1: bloque de polietileno y resina Plastiroc
- Caso 2: bloque de polietileno y resina VA60
- Caso 3: bloque de hormigón y resina Plastiroc

Estos materiales al igual que las capas de la estructura se caracterizaron principalmente mediante su densidad y conductividad térmica, siendo estas propiedades térmicas las recogidas en la tabla que se muestra a continuación.

Principales propiedades térmicas			
Función	Material	Densidad (kgm ⁻³)	Conductividad térmica (Wm ⁻¹ K ⁻¹)
Capa 1	Mezcla hormigón-betún	2480	2
Capa 2	Mezcla grava-betún	2350	1,9
Capa 3	Terreno	1800	2
Bloque de la bobina	Polietileno	1400	0,42
	Hormigón	2285	2,1
Resina de sellado	Plastiroc	1830	0,82
	VA60	1080	0,32

Tabla. 2. Principales propiedades térmicas. [2]

Las simulaciones llevadas a cabo consideraron un día caluroso de verano en París e intercambios de calor con el entorno en forma de radiación solar, convección con el viento y transferencia de calor por radiación entre la estructura y el cielo. El cálculo se realizó usando una malla de elementos finitos y durante tres días virtuales. Durante los dos primeros días, sólo se aplicó la carga ambiental, para dejar que la estructura alcanzara su campo de temperatura de estado estacionario. El tercer día, en cambio, el sistema de carga se encendió a las 6 de la mañana, dando a las 65 horas desde el inicio de la simulación las temperaturas de máximo valor.

Los resultados de la simulación del Caso 1, siendo la Fig.16 el momento de mayor temperatura, muestran valores de 83 °C en el bloque de la bobina y 70 °C en el pavimento. Como se puede observar, la presencia de la unidad de carga supone una alteración respecto de la distribución de temperatura que tiene la estructura en las zonas más alejadas del bloque. Esto no solo se debe a la propia integración de nuevos materiales que alteran la uniformidad de la estructura, si no a la gran carga térmica que genera el sistema de carga.

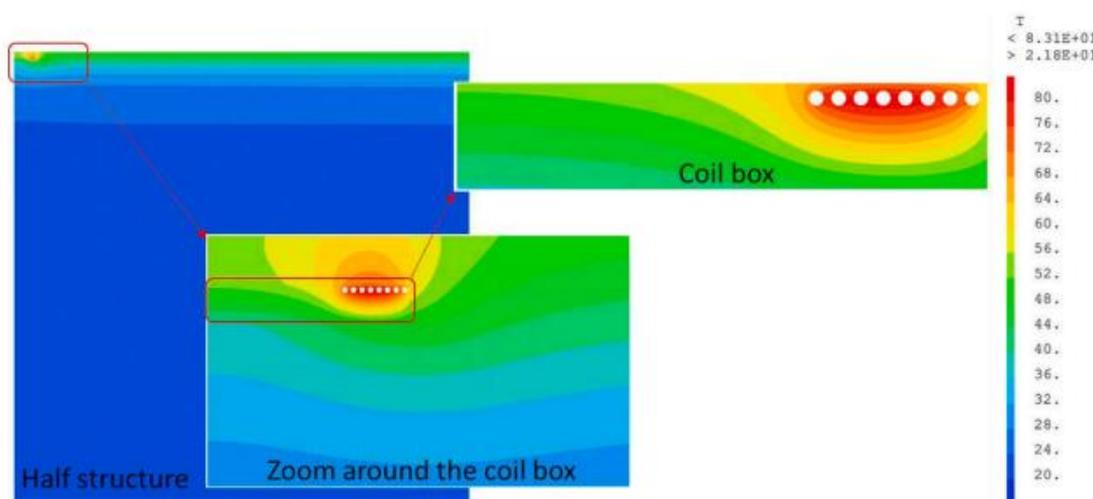


Fig. 16. Campo de temperaturas del Caso 1. [6]

La Fig. 17 muestra la comparativa de los resultados de las simulaciones del Caso 1 y 2, donde para la resina VA60 la temperatura en el bloque de la bobina fue de 94 °C y para la resina Plastiroc de 83 °C. De cara al resto de la estructura, los puntos de temperatura máxima se dieron en el pavimento, con tan solo 0,5 °C de diferencia entre la aplicación de una resina u otra.

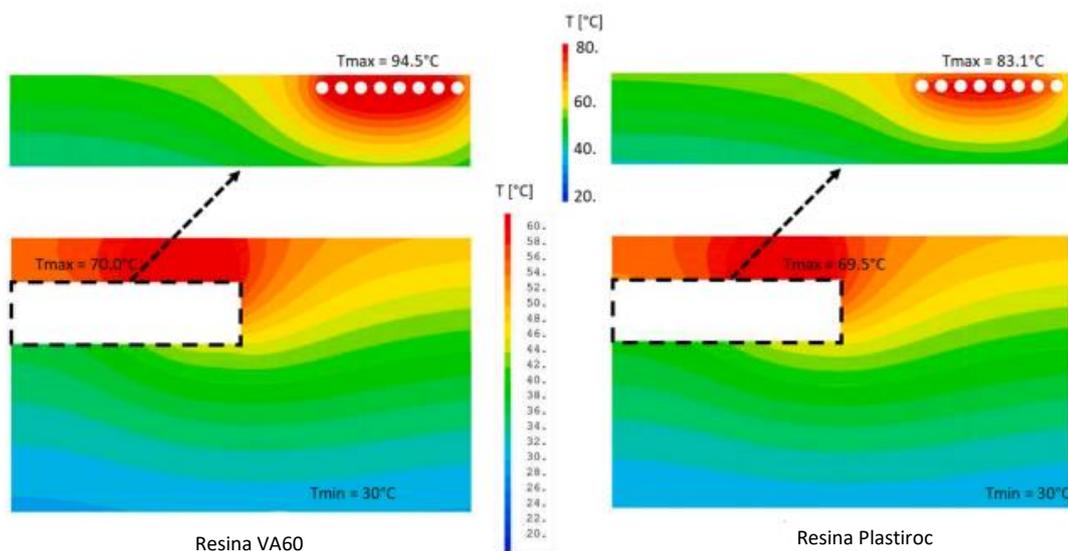


Fig. 17. Influencia de la resina. [6]

Por último, los resultados del Caso 3, correspondientes a la Fig. 18, dejaron ver unas temperaturas de 65 °C en la bobina y de en torno a 62 °C en el asfalto, lo que supone unos valores respecto al bloque de polietileno de 18 °C menos en la bobina y 7 °C menos en el pavimento. Esta reducción de la temperatura se refleja también en su distribución a lo largo de la estructura, dejando ver un campo de temperatura donde los valores máximos reducen considerablemente su área.

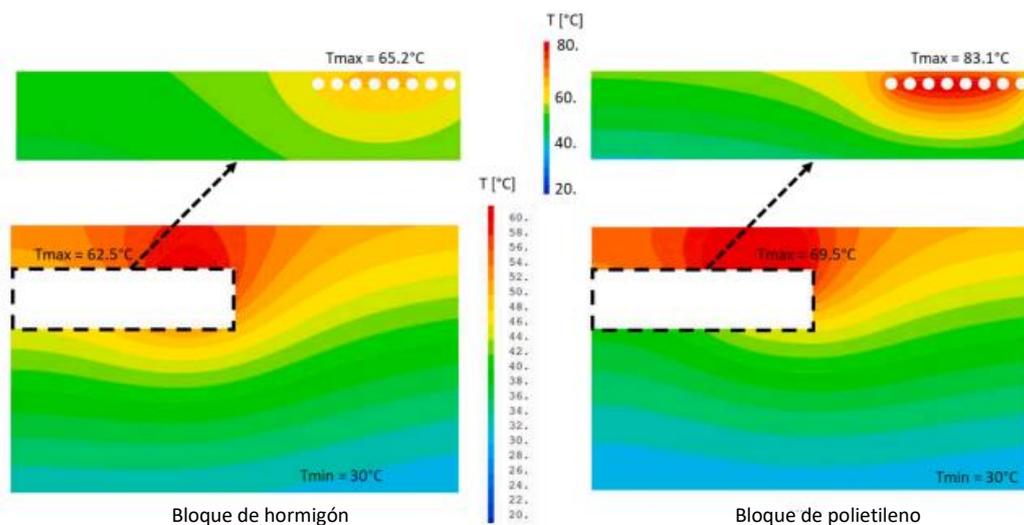


Fig. 18. Influencia del material del bloque de la bobina. [6]

7.2.3 Estudio 3: Estudio del comportamiento térmico realizado por Talita de Freitas Alves

Talita de Freitas Alves llevó a cabo un estudio, [3], donde se realizaron diferentes análisis del comportamiento de una eRoad ante diferentes aspectos, como lo son las cargas generadas por el paso del tráfico o la influencia de la temperatura. No obstante, en este apartado se recogerán únicamente los resultados relacionados al comportamiento térmico, dejando los relacionados al comportamiento mecánico para el apartado 8.

7.2.3.1 Análisis mediante Elementos Finitos

Las estructuras tomadas como referencia para este estudio fueron dos tRoad: una autopista francesa (A63) y una carretera federal brasileña de alto tráfico (BR-381). El pavimento francés estaba compuesto por un hormigón bituminoso semidenso como capa de rodadura (BBSG) y por una mezcla bituminosa con alta resistencia a la deformación permanente como base y cimentación (GB). Por su parte, el pavimento brasileño era una estructura compuesta por un hormigón bituminoso como capa de rodadura (CBUQ) y por una capa base no ligada de piedra triturada (BGS). Ambas estructuras descansaban sobre un terreno tratado con ligante hidráulico. [3]

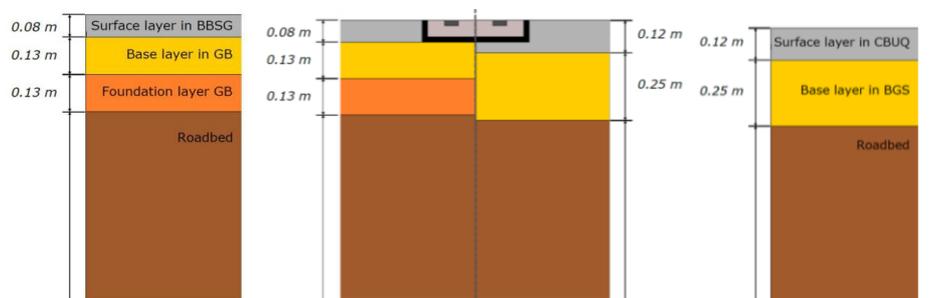


Fig. 19. A la izquierda la A63 y la derecha la BR-381, en el centro la integración del sistema IPT. [3]

Como se observa en la imagen anterior, se llevó a cabo la integración del sistema de carga en la capa superior de la estructura, sin ser este tapado en ningún momento por algún tipo de capa o protección que no fuera el propio. Las propiedades térmicas del sistema de carga y los diferentes materiales se recogen en las tablas mostradas a continuación.

Principales propiedades térmicas de la estructura francesa			
Función	Material	Densidad (kgm ⁻³)	Conductividad térmica (Wm ⁻¹ K ⁻¹)
Capa 1	BBSG	2480	2
Capa 2	GB	2350	1,9
Capa 3	GB	2350	1,9
Capa 4	Terreno	2200	1,8

Tabla. 3. Principales propiedades térmicas de la estructura francesa. [3]

Principales propiedades térmicas de la estructura brasileña			
Función	Material	Densidad (kgm ⁻³)	Conductividad térmica (Wm ⁻¹ K ⁻¹)
Capa 1	CBUQ	2450	1212
Capa 2	BGS	1700	0,695
Capa 3	Terreno	2200	1,5

Tabla. 4. Principales propiedades térmicas de la estructura brasileña. [3]

Principales propiedades térmicas del sistema de carga			
Función	Material	Densidad (kgm ⁻³)	Conductividad térmica (Wm ⁻¹ K ⁻¹)
Railes	Mezcla de metales	7800	46
Sellado	EPDM	1060	0,5
Sellado	VA-60	1080	0,32

Tabla. 5. Principales propiedades térmicas del sistema de carga. [3]

El primer análisis de Elementos Finitos tenía como objetivo verificar la evolución de los campos de temperatura en la sección de la tRoad francesa, comprobando que los datos obtenidos en las simulaciones eran fiables y el método de análisis adecuado. Para ello, un centro de investigación francés proporcionó datos de sensores térmicos instalados a diferentes profundidades de la autopista francesa, con los que se compararon las evoluciones de temperatura durante 48 horas en los puntos PY1, PY2 y PY3 del modelo. [3]

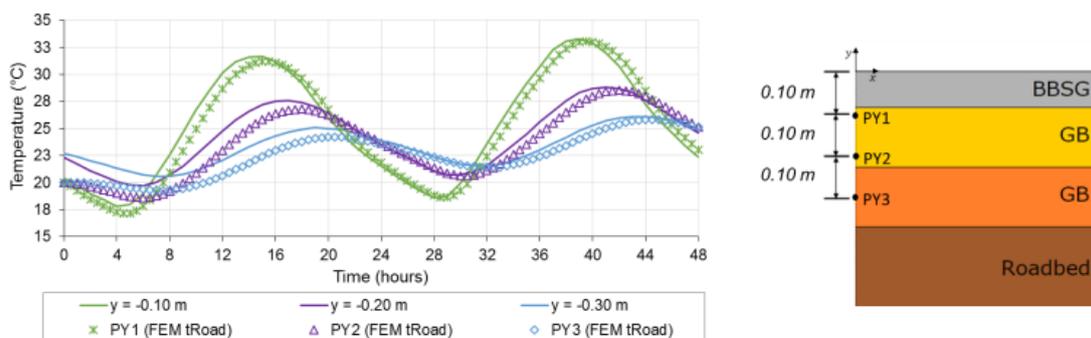


Fig. 20. Comparativa entre los resultados de las primeras simulaciones y las mediciones en campo. [3]

La Fig. 20 muestra los resultados de las primeras simulaciones y los compara a las mediciones de los sensores instalados en campo, siendo los datos obtenidos muy parejos. Se puede observar cómo durante las primeras horas de la simulación existen pequeñas diferencias entre las curvas de temperatura obtenidas en campo y en el modelo, pudiendo ser debidas a la definición de una temperatura inicial homogénea de 20 °C en el modelo de EF. Sin embargo, a medida que el tiempo de simulación avanzaba, las curvas de EF empezaron a ajustarse a las amplitudes y ciclos de temperatura observados en campo. Este resultado sirvió principalmente para determinar que las propiedades térmicas de los materiales asumidas para los cálculos eran representativas de las condiciones reales de campo y que las hipótesis

consideradas para el comportamiento térmico se ajustaban a este estudio. Cabe destacar que la temperatura máxima registrada fue en el PY1 con un valor de 30,03 °C y que, tras realizar la misma simulación a la carretera brasileña, se obtuvo un valor máximo de temperatura de 32,65 °C. [3]

Tras estos primeros análisis, se pasó a simulaciones de las estructuras de eRoad antes mencionadas, donde se incorporaba el sistema de carga tanto a la carretera francesa como a la brasileña, pero sin simular la carga térmica del sistema de carga. A fin de comparar el impacto de esta integración en la evolución de la temperatura en el interior de la estructura se investigaron principalmente dos puntos. El punto PY1 está situado 2 cm por debajo de la CU y en el eje de simetría de la geometría bidimensional; mientras que el punto PC está situado a la misma altura que el punto PY1, pero en el eje de la interfaz entre el sistema elastómero-epoxi y la superficie de rodadura. [3]

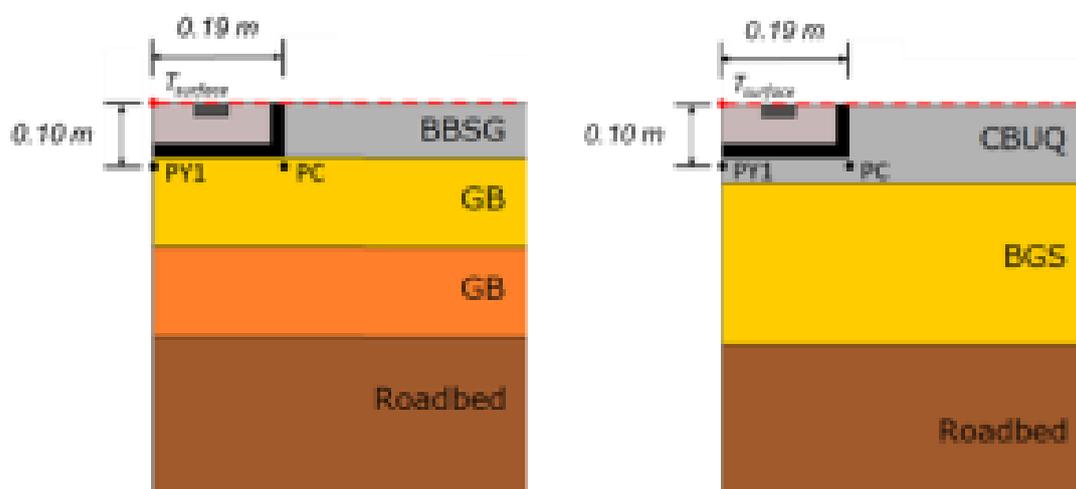


Fig. 21. Situación de los puntos PY1 y PC. [3]

En el caso de la eRoad francesa, tanto PY1 como PC están situados en la capa de base bituminosa (GB), es decir, justo debajo de la capa de rodadura de la carretera. Para la eRoad brasileña, ambos puntos permanecen en la superficie bituminosa de rodadura (CBUQ). [3]

Los resultados de estos análisis se muestran en los gráficos de la Fig. 22, donde se aprecia la evolución de la temperatura de ambos pavimentos durante un periodo simulado de 48 horas. Como era de esperar, las horas cercanas al medio día son las que mayor temperatura han registrado, con temperaturas ambiente de 38,8 °C en la carretera francesa y 46,1 °C en la brasileña. No obstante, las temperaturas registradas en los puntos de análisis, estando estos a mayor profundidad, ha sido mucho menor. En la carretera francesa, los puntos PY1 y PC, obtuvieron unos valores de 27,21 °C y 23,98 °C respectivamente, y en la brasileña, en cambio, 29,74 °C y 26,74 °C. [3]

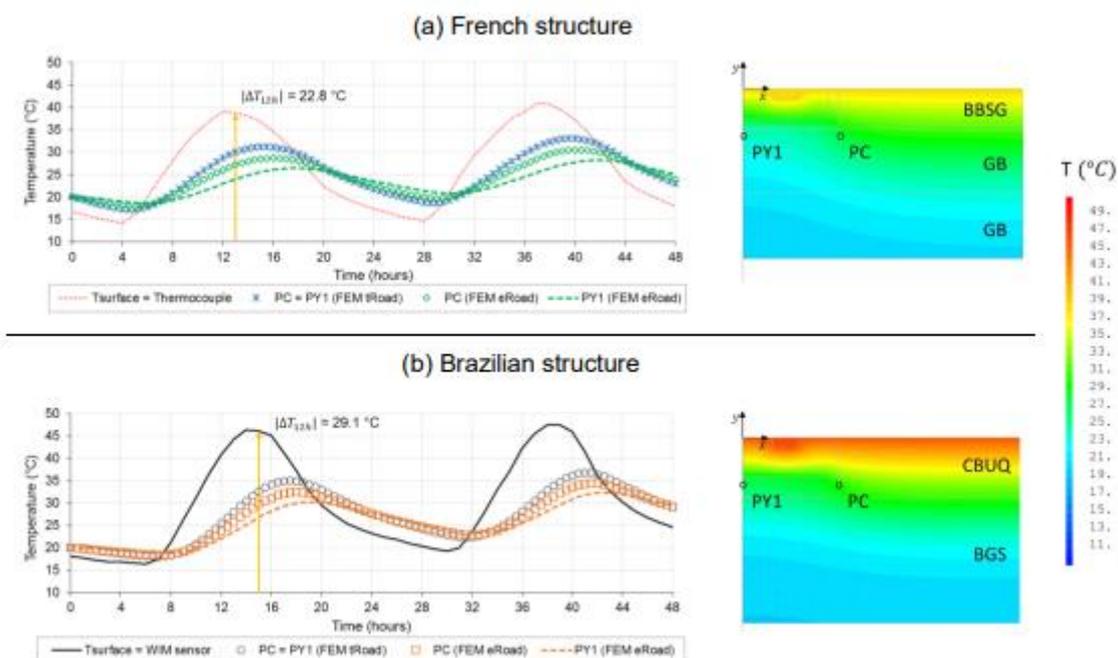


Fig. 22. Resultados de los análisis de las eRoad. [3]

En los campos de temperatura de la Fig. 22 se puede observar una distribución irregular provocada por la integración del sistema de carga, más concretamente, por sus componentes gomosos que desarrollaron un efecto de aislamiento térmico de la zona situada bajo el conjunto. A mayor distancia del centro de la unidad de carga, menor es la influencia del conjunto en el flujo de calor en el interior de la estructura. Esto se observa, por ejemplo, en el punto PC, que se encuentra a la misma profundidad y también en la misma capa que PY1, pero más cerca de los bordes de la unidad de carga provocando que la influencia de los materiales gomosos sea menos significativa. [3]

El gradiente térmico vertical obtenido para la tRoad brasileña fue casi dos veces superior al gradiente obtenido para el tRoad francés. Esto se explica principalmente por una mayor variación de temperatura en el pavimento brasileño y las diferentes propiedades térmicas de las mezclas bituminosas que componen cada perfil de pavimento. De cara al primer factor, se debe a una mayor variación diaria de la temperatura en Brasil, unida a una temperatura que no varía tanto bajo la unidad de carga debido a sus propiedades aislantes, provocando así un mayor gradiente. El segundo factor, por su parte, está relacionado con la conductividad térmica de la mezcla CBUQ, que es inferior a las de las mezclas BBSG y GB, lo que significa que el calor se disipaba más lentamente en el interior de la estructura brasileña. [3]

Una vez incluida la unidad de carga en la superficie de rodadura de los pavimentos, el gradiente térmico vertical aumentó para ambas estructuras como consecuencia de las propiedades de la unidad de carga. Además, debe prestarse atención a la generación de un gradiente térmico horizontal debido a la presencia de la unidad de carga. [3]

7.2.3.2 Análisis experimentales

En esta parte del estudio, se fabricaron y sometieron a pruebas de carga térmica dos tipos de probetas: seis tRoads y seis eRoads. Para las probetas tRoad, las losas de mezcla asfáltica se cortaron buscando vigas rectangulares simples. Para las muestras eRoad, en cambio, se creó una zanja en el centro de las losas para alojar el lecho de EPDM y una capa adhesiva de VA-60 y, después del montaje, se aserraron en vigas rectangulares. El esquema de estas últimas, así como una muestra de la probeta de ensayo pueden verse en la Fig. 23.

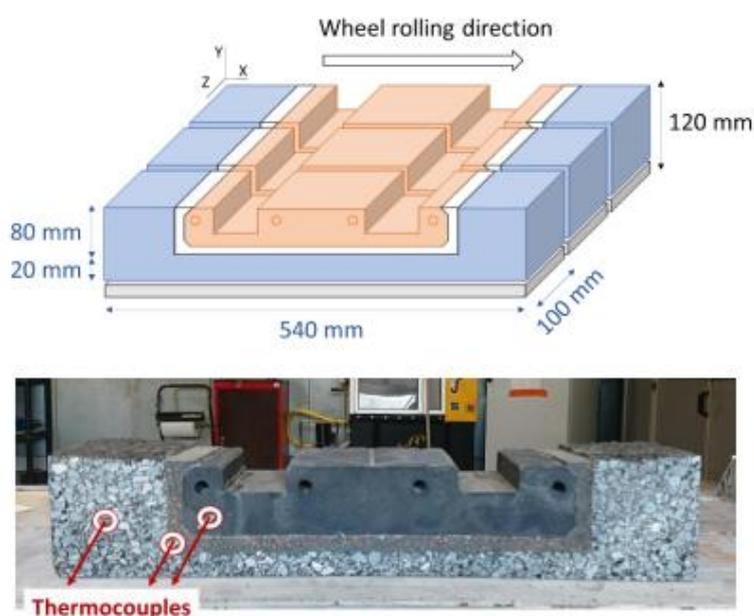


Fig. 23. Probeta de ensayo. [3]

El objetivo del ensayo realizado consistía en caracterizar la respuesta de las probetas de eRoad a las fluctuaciones diarias de temperatura. Para ello, todas las probetas ensayadas recibieron primero un tratamiento de moteado en sus superficies frontales y, posteriormente, se sometieron a ciclos de carga térmica dentro de una cámara climática.

Estos ensayos tenían por objeto recrear las fluctuaciones diarias de temperatura observadas sobre el terreno con gradientes de temperatura del orden de 25-30°C en la superficie de la carretera desde medianoche hasta mediodía. Para ello, se usaron las curvas de la Fig. 24 que representan la evolución de la temperatura registrada en el termopar instalado en el interior de la cámara durante las pruebas de ciclo cálido y frío. [3]

En la Fase I, la velocidad de variación de la temperatura se fija en la más lenta permitida por el software de la cámara (0,1 °C por minuto) y un sistema de flujo de aire vertical dirigido a 2,3 m/s controla la variación de temperatura. La cámara tarda 5 horas en aumentar la temperatura de 20°C hasta la temperatura objetivo de 50°C (ciclo cálido) o en disminuir hasta la temperatura objetivo de 10°C (ciclo

frío). Tras alcanzar la temperatura objetivo, la cámara se programa para mantener esta temperatura durante 2 horas. [3]

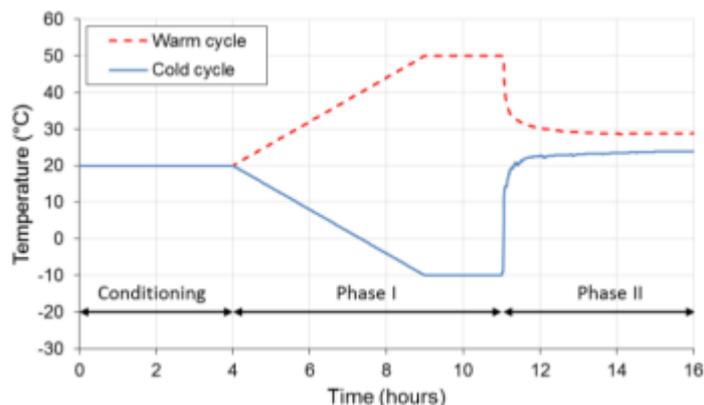


Fig. 24. Fases del ciclo térmico. [3]

La Fase II comienza cuando se apaga y abre la cámara, lo que lleva a las probetas de vuelta a la temperatura ambiente. Se puede observar cómo, aunque ambos ciclos comienzan a una misma temperatura, el hecho de haber sido realizados a diferentes días y horas, a la par que la dificultad para controlar la temperatura de la sala, llevan a que no lleguen a la misma temperatura final. En la Fig. 25, mostrada a continuación, se pueden observar las características de las probetas de eRoad analizadas en estos ensayos junto al ciclo térmico al que se les sometió.

Specimen	Dimensions (cm)*	Weight (kg)	Cycle
CP07	53.00 x 10.83 x 10.00	9.90	Warm
CP08	53.40 x 10.70 x 10.00	9.44	Warm
CP09	53.50 x 11.10 x 10.50	10.40	Warm
CP10	53.80 x 10.50 x 10.00	9.50	Cold
CP11	53.70 x 10.26 x 10.25	9.64	Cold
CP12	53.00 x 10.60 x 10.30	9.26	Cold

Fig. 25. Características de las probetas de eRoad. [3]

A fin de no saturar con múltiples resultados este apartado, se muestran únicamente los resultados del CP07, donde se aplicó el ciclo cálido, y el CP10, sometido al ciclo frío, que resultaron en los campos de desplazamiento y deformaciones mostrados en las Fig. 26 y 27 respectivamente.

En términos de campos de desplazamiento, los dos ciclos de carga térmica dieron lugar a movimientos de las probetas en dirección opuesta. En este caso, el EPDM es el material con la mayor magnitud de coeficiente térmico y responsable de la segunda mayor proporción de volumen de la probeta eRoad, siendo así que el comportamiento global se ve muy influenciado por él. [3]

En los ciclos en caliente, la fuerte expansión del EPDM en las direcciones x e y curvó la probeta hasta darle una forma cóncava hacia abajo. En los ciclos fríos, en cambio, su contracción curvó la probeta hacia arriba. Cabe destacar que, a partir de los campos de desplazamiento, también puede observarse que el fenómeno de flexión se produce de forma asimétrica con respecto al eje y. En cuanto a los campos de deformación, las zonas con una concentración de colores rojos indican una deformación significativa a tracción y las zonas con colores azules intensos indican una deformación significativa a compresión. [3]

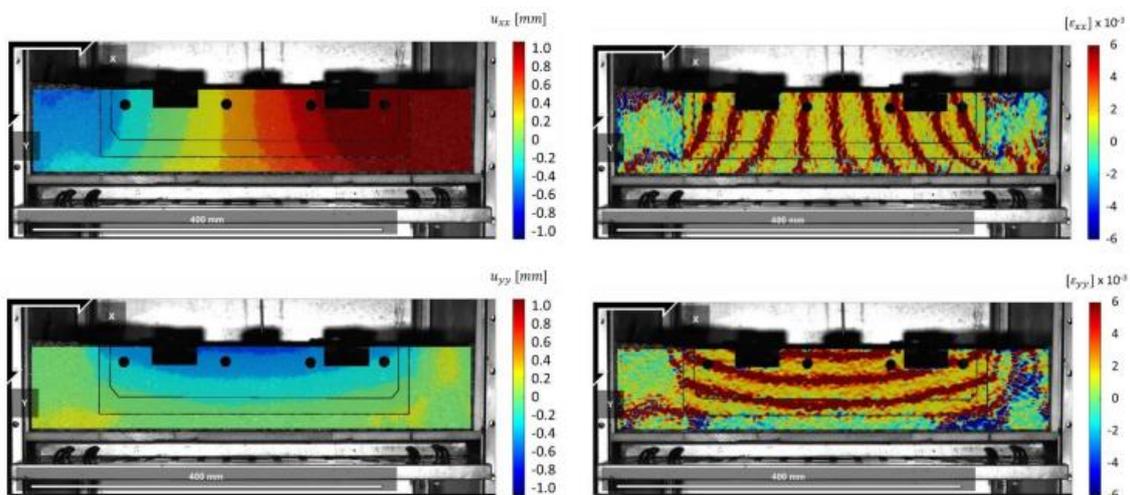


Fig. 26. Resultados tras ensayar la probeta CP07. [3]

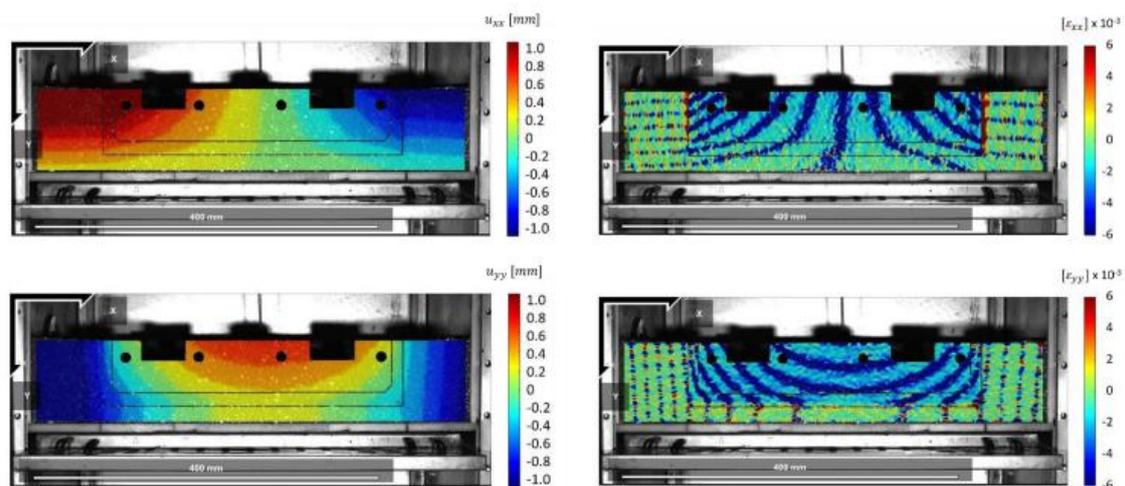


Fig. 27. Resultados tras ensayar la probeta CP10. [3]

En las tres probetas ensayadas en ciclos calientes, los alrededores de la unidad de carga a nivel superficial mostraron altos niveles de deformación por compresión en la dirección horizontal (ϵ_{xx}). Las esquinas de la unidad de carga, en profundidad, también se identificaron como zonas críticas de concentración de deformación.

Estas deformaciones significativas se transmitieron a los demás componentes, lateralmente en algunos casos y verticalmente en otros. Para los casos de ciclo caliente, la deformación por tracción de los materiales elastómeros se transmitió a la capa de mezcla asfáltica inmediatamente por debajo de las inclusiones bajo la zanja. El nivel de deformación horizontal por tracción que alcanzó la mezcla asfáltica bajo la unidad de carga es preocupante, ya que puede provocar daños por inicio y propagación de grietas.

El comportamiento de los materiales elastómeros, que se deformaron horizontalmente de forma similar a la silueta de las raíces de los árboles, es un aspecto que se repite en los diferentes análisis. Por ello, aunque es un aspecto que podría llevar a investigaciones mayores, en el estudio lo tomaron como una característica del material.

En la probeta sometida a ciclos en frío, se observa una fuerte concentración de deformación vertical a tracción en la zona inferior de la zanja. Además, en oposición a lo observado durante los ciclos cálidos, los materiales tienden a encogerse cuando se enfrentan a temperaturas frías. Su cambio volumétrico no es completamente seguido por el material asfáltico debido a su reducido coeficiente de contracción térmica, su comportamiento viscoelástico intrínseco, sus características físicas y las condiciones límite del ensayo.

7.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tras analizar los datos de los diferentes estudios, el principal aspecto que se puede determinar es que la propia integración del sistema de carga supone la generación de irregularidades en la estructura, es decir, disponer de una pequeña zona con nuevos materiales rompe la uniformidad que una carretera tradicional tiene normalmente. Al fin y al cabo, estas acciones generan puntos críticos, sobre todo en las zonas donde se pasa bruscamente de un material a otro cuyas propiedades pueden ser muy diferentes.

Este aspecto se aprecia con claridad en los resultados del Estudio 3, donde se realizan ensayos de la estructura con la unidad de carga ya integrada, pero sin llegar a simular la carga térmica que generaría su funcionamiento. Como se aprecia en la Fig. 22, la zona alejada respecto de la unidad de carga registra una variación vertical de la temperatura, pero horizontalmente los valores se mantienen uniformes. Esto no ocurre en la zona cercana a la bobina, donde los materiales que forman la unidad de carga, han provocado una variación de la temperatura en ambos ejes.

De los datos obtenidos por los Estudios 1 y 2, se puede determinar que la mayor carga térmica es el calor generado por el funcionamiento del sistema de carga, más concretamente, la zona cercana a la bobina principal del sistema. En este aspecto, si se comparan las simulaciones a escala real llevadas a cabo por el Estudio 1 y el Caso 1 del Estudio 2, donde se usaron carcasas de polietileno y material de sellado de características térmicas similares, se puede ver como los valores de temperatura obtenidos fueron 82 °C y 83 °C respectivamente, siendo la diferencia de solo 1 °C. De este modo, se observa la veracidad de las

simulaciones realizadas y como en ambos casos son las zonas cercanas a la bobina las que mayor temperatura registran, disminuyendo esta al alejarse de la misma.

Entre las demás cargas térmicas, la temperatura ambiente es un aspecto que afecta de manera directa no solo a las capas superiores de la estructura, si no que genera un aumento global de temperatura en toda la carretera. Así mismo, es esta temperatura ambiente y los flujos de calor con el entorno los que hacen que las zonas de la carretera más alejadas a la bobina, sobre todo las capas más superficiales, varíen de temperatura. Las capas inferiores de la carretera, al ser puntos que están alejados de los principales focos de calor, registran siempre las temperaturas más bajas y son zonas donde su valor varía de forma más desapercibida.

Este aspecto se aprecia en los resultados de los diferentes estudios, aunque es en el Estudio 3 donde quizá se refleja de manera más clara, más concretamente, en las Fig. 20 y 22. En ellas se puede ver la variación de la temperatura a diferentes horas del día y como un aumento o disminución de la temperatura ambiente genera el mismo efecto en la carretera. En este sentido, destacan las horas cercanas al medio día ya que registran las mayores temperaturas ambiente y de la carretera.

Tras comprender como afectan estas cargas a la estructura e identificar el aspecto del campo de temperaturas, el siguiente punto de análisis es la influencia de las propiedades térmicas de los materiales, destacando entre ellas la conductividad térmica. Esta propiedad se define como la capacidad de un material para conducir calor y como se aprecia en los resultados de los diferentes estudios es un aspecto clave.

Esto se aprecia claramente en los resultados mostrados en la Fig. 12, que corresponden a las simulaciones a pequeña escala del Estudio 1, donde se muestra la influencia que la conductividad térmica de la mezcla asfáltica tiene sobre la totalidad de la estructura. En este caso, las zonas que más varían en función del aumento de la conductividad son las cercanas a la bobina, donde la temperatura registrada por el sensor T-0 desciende aproximadamente 22 °C.

Si como se hizo al principio de este apartado, se comparan las simulaciones a escala real llevadas a cabo por el Estudio 1 y el Caso 1 del Estudio 2, donde las propiedades térmicas de la carcasa y la resina de sellado eran similares, se consiguen valores de temperatura en la bobina muy cercanos. No obstante, se puede ver que la diferencia en la conductividad de las demás capas de la carretera influye considerablemente en la temperatura de las mismas, siendo claro ejemplo de esto la capa superior, es decir, la que está en contacto con el entorno de manera directa. Esta capa en el Estudio 1, donde la mezcla asfáltica tiene una conductividad de $1,3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, deja valores de 62 a 69 °C, y en el Estudio 2, en cambio, con unos materiales de rondan una conductividad de $2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, tiene valores de entre 60 y 64 °C en la zona superior a la bobina, pero al alejarse de esta se pasa a valores de entre 48 y 52 °C.

Del mismo modo que se ha mostrado la influencia de la conductividad térmica de las capas que forman la carretera, los resultados de las simulaciones también dejan ver que variar esta propiedad en la carcasa de la bobina o la resina de sellado afecta a las temperaturas registradas. De los resultados del Estudio 2 mostrados en la Fig. 17, se concluye que aumentar la conductividad de la resina de sellado no varía en gran medida la temperatura de los materiales del pavimento, con una diferencia de 0,5 °C entre simulaciones. Sin embargo, si disminuye considerablemente la temperatura en la unidad de carga, con una reducción de casi 10 °C. El material del bloque de la bobina, por su parte, afecta de manera considerable a las temperaturas, siendo así que disponer de una carcasa de hormigón con conductividad térmica de $2,1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ en vez de una de polietileno de $0,42 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, redujo 18 °C en la bobina y 7 °C en el pavimento.

De cara a la temperatura, se puede concluir que la carga térmica generada por el sistema de carga es la principal fuente de calor, seguida de los flujos de temperatura con el entorno, donde es la temperatura ambiente la que mayor influencia llega a tener. El control sobre estas cargas es algo complicado y que en muchos casos carece de soluciones accesibles. Por ejemplo, añadir un sistema de refrigeración al sistema de carga podría ser una solución viable para reducir las altas temperaturas en la estructura, pero aumenta el desafío que ya supone la propia integración. Las cargas del entorno, por su parte, son acciones que dependen principalmente del clima.

Ante esta situación, la correcta elección de los materiales y sus propiedades térmicas parece la solución más prometedora, dando especial importancia a elegir materiales de alta conductividad térmica. De los estudios analizados se ve como elementos como el hormigón llegan a tener conductividades capaces de reducir en gran medida las temperaturas que se llegan a registrar, por lo que, por ejemplo, el uso de áridos de alta conductividad como la cuarcita o aditivos como el grafito podrían ser de gran utilidad.

Como pincelada final al apartado, aunque se ha hecho hincapié en las cargas térmicas y la distribución de las temperaturas a lo largo de la estructura, cabe destacar la importancia que el comportamiento térmico tiene sobre los desplazamientos y deformaciones, dejando claro que no solo la carga del tráfico influye sobre ellos. Esto se aprecia claramente en los resultados experimentales del Estudio 3, donde los diferentes ciclos de temperatura causan desplazamientos y deformaciones en los materiales de las probetas analizadas.

En estos análisis, se observan concentraciones de deformación en las uniones entre la unidad de carga y la carretera, del mismo modo que aparecen zonas críticas en los propios materiales que forman la unidad. Esto puede llevar a la aparición de grietas o despegue de un material respecto del otro, lo que puede dar pie, por ejemplo, a la penetración de agua. En el caso de una eRoad, el posible contacto del cableado electrificado y el agua presente en el pavimento constituye una fuente de peligro alarmante para la seguridad de los usuarios.

8 COMPORTAMIENTO MECÁNICO

Este apartado muestra la importancia que el comportamiento mecánico de la estructura y los materiales tienen sobre el diseño de las eRoad, comenzando con las generalidades y siguiendo después con datos de ensayos y su análisis.

8.1 GENERALIDADES

Una eRoad, aunque busca ser una estructura para carga de vehículos eléctricos, no deja de ser una carretera que debe soportar el paso del tráfico de manera constante. Es así que los valores máximos de tensiones y deformaciones que se den en la estructura con el sistema de carga integrado no pueden superar los límites de tensión o deformación compatibles con los diferentes materiales de la carretera.

El análisis del comportamiento mecánico de las carreteras convencionales se suele llevar a cabo con metodologías basadas en teorías de capas elásticas. De este modo, se utiliza el concepto de carga equivalente de un solo eje con un área de contacto circular como parámetro para tener en cuenta tanto el volumen de tráfico como los niveles de carga. Las principales zonas tensionales, mostradas en la Fig. 28, son las siguientes: [3]

- Directamente debajo del eje de la rueda, el tráfico y la carga son responsables del desarrollo de tensiones verticales de compresión que se transmiten a través de las capas hasta alcanzar el terreno.
- Debido a la deflexión, se desarrollan tensiones de tracción y compresión por debajo y en los alrededores de la zona de aplicación de la carga.
- Delante y detrás de la carga de la rueda, en la parte inferior de la capa, se generan tensiones de compresión, mientras que debajo de la rueda las tensiones son fuertemente de tracción.

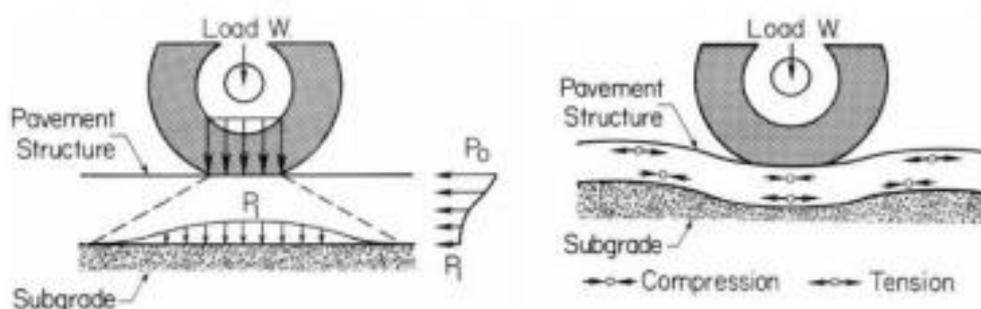


Fig. 27. Distribución de tensiones ante carga de tráfico. [3]

El número de repeticiones y la velocidad del tráfico y de la carga son parámetros importantes, especialmente cuando se utilizan teorías viscoelásticas, ya que determinan la duración y la gravedad de los procesos de carga y descarga que conducen a daños acumulativos. En ese sentido, las mezclas asfálticas se comportan como materiales viscoelásticos, cuya respuesta mecánica depende del tiempo de

carga. A frecuencias altas, el material muestra sobre todo un comportamiento elástico, mientras que a frecuencias bajas el componente viscoso es más significativo que el componente elástico, y el material se comporta más como un fluido. [3]

La consideración del tráfico y las cargas en el diseño de firmes varían en función del emplazamiento de la carretera y el reglamento de aplicación vigente en la zona, existiendo lugares como Francia donde se utiliza el número estimado de vehículos pesados de transporte de mercancías por día para elegir aspectos como los materiales de las capas del firme y el espesor de cada una de ellas. En España, por ejemplo, es de aplicación la Norma 6.1 IC, donde la carga del tráfico viene también definida como la intensidad media diaria de vehículos pesados (IMDp). [3]

Entre los daños más comunes inducidos por el tráfico se encuentra la rodera o deformación permanente, que puede definirse como la deformación acumulativa e irre recuperable que se produce en las trayectorias de las ruedas como resultado de la carga repetida del tráfico. El desarrollo de una rodera es causado por el movimiento plástico y viscoso de las mezclas asfálticas debido a la alta temperatura en servicio o a la compactación inadecuada durante la construcción. Esto se ve directamente influenciado por aspectos como el tipo de árido, huecos de aire en las mezclas asfálticas, tipo y cantidad de aglomerante asfáltico, temperatura en servicio y carga de tráfico. Entre estos factores, las propiedades del aglomerante contribuyen aproximadamente en un 40% a la resistencia a las roderas de los pavimentos asfálticos. [8]

Ante esto, la composición y cohesión de las mezclas asfálticas y la capacidad portante de las capas granulares desempeñan un papel crucial y, en consecuencia, factores climáticos como la temperatura y la humedad, ya que afectan directamente a las propiedades de estos materiales. Por ello, se usan diferentes tipos de ensayos para caracterizar la contribución de cada factor de la mezcla en la formación de roderas variando la temperatura, los niveles de confinamiento y la magnitud y tasa de carga, pero sigue siendo difícil predecir la aparición de este tipo de daño. No obstante, varios estudios apuntan a que el tráfico pesado y la carga continua a baja velocidad y altas temperaturas constituyen el escenario más crítico para un rápido desarrollo de la deformación permanente, así como un alto contenido de huecos de aire. [8]

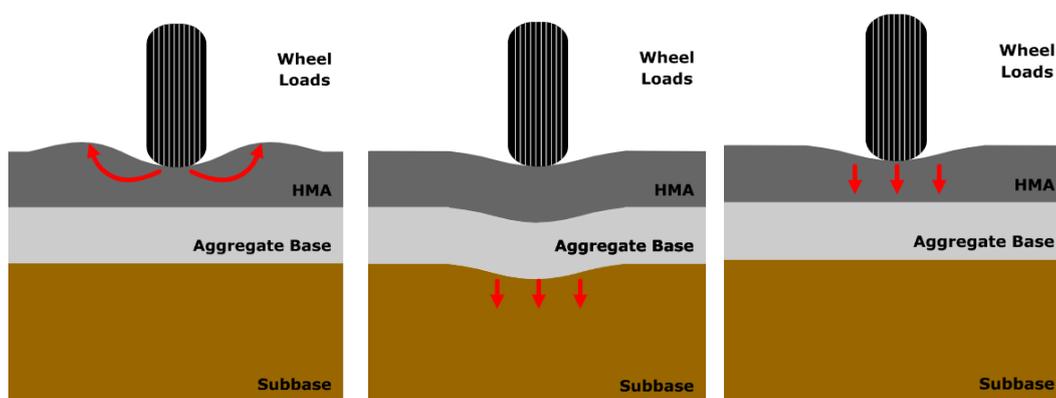


Fig. 28. Ejemplos de roderas. [3]

Otro daño común en estas estructuras es la fisuración por fatiga que se produce por la rotura del material bajo cargas repetidas, aunque las tensiones aplicadas estén muy por debajo de la resistencia última del material. Sobre el terreno, la rotura debida a la fatiga se caracteriza tradicionalmente por grietas que se inician en la parte inferior de las capas del pavimento y se propagan hasta el nivel de la superficie. [3]

En laboratorio, la vida a fatiga se aborda en términos de vida de fractura (Nf) o vida de servicio (Ns), que correlacionan el número de aplicaciones de carga hasta el fallo por fatiga o hasta la disminución del rendimiento de la probeta, respectivamente. Los ensayos de fatiga se pueden realizar para un rango de frecuencias y temperaturas, buscando recrear la carga y la velocidad del tráfico de campo, el período de descanso y las condiciones climáticas para lugares y/o períodos específicos del año. [3]

Al tratar con las eRoad, los aspectos descritos anteriormente singuen siendo de aplicación y muchas veces los daños podrán verse mayorados al integrar estos sistemas de carga en las carreteras convencionales. Esto se debe, a que la integración no deja de ser una acción que cambia la estructura ya establecida y donde aparecen cambios de sección o material que antes no estaban, pudiendo llevar a un mal comportamiento de la nueva estructura. No obstante, y como se verá más adelante, elegir las características de los materiales adecuadamente puede garantizar el buen funcionamiento de este tipo de estructuras.

8.2 RESULTADOS DE DIFERENTES ESTUDIOS

8.2.1 Estudio 4: Ensayos realizados por el proyecto INCIT-EV

El proyecto INCIT-EV, ya presentado en el apartado 7.2.2, llevó a cabo, entre sus muchos análisis, ensayos que buscaban analizar el comportamiento mecánico de la estructura de la eRoad ante la carga del tráfico [2]. Para ello, se usó el mismo diseño que se presentaba anteriormente en la Fig. 15 y los diferentes casos donde se jugaba con la composición del bloque de la bobina y la resina de sellado. Las propiedades mecánicas de los materiales que forman la estructura se resumen en la Tabla. 6.

Principales propiedades mecánicas			
Función	Material	Densidad (kgm- 3)	E (MPa)
Capa 1	Mezcla hormigón-betún	2350	5400
Capa 2	Mezcla grava-betún	2350	9300
Capa 3	Terreno	2000	50
Bloque de la bobina	Polietileno	950	2300
	Hormigón	2285	35000
Resina de sellado	Plastiroc	1830	5662
	VA60	1080	4,34

Tabla. 6. Principales propiedades mecánicas. [2]

El análisis se llevó a cabo aplicando una carga, correspondiente a un eje de doble rueda cargado a 130 kN, en seis casos de carga diferentes, como se muestra en las Figs. 29 y 30.

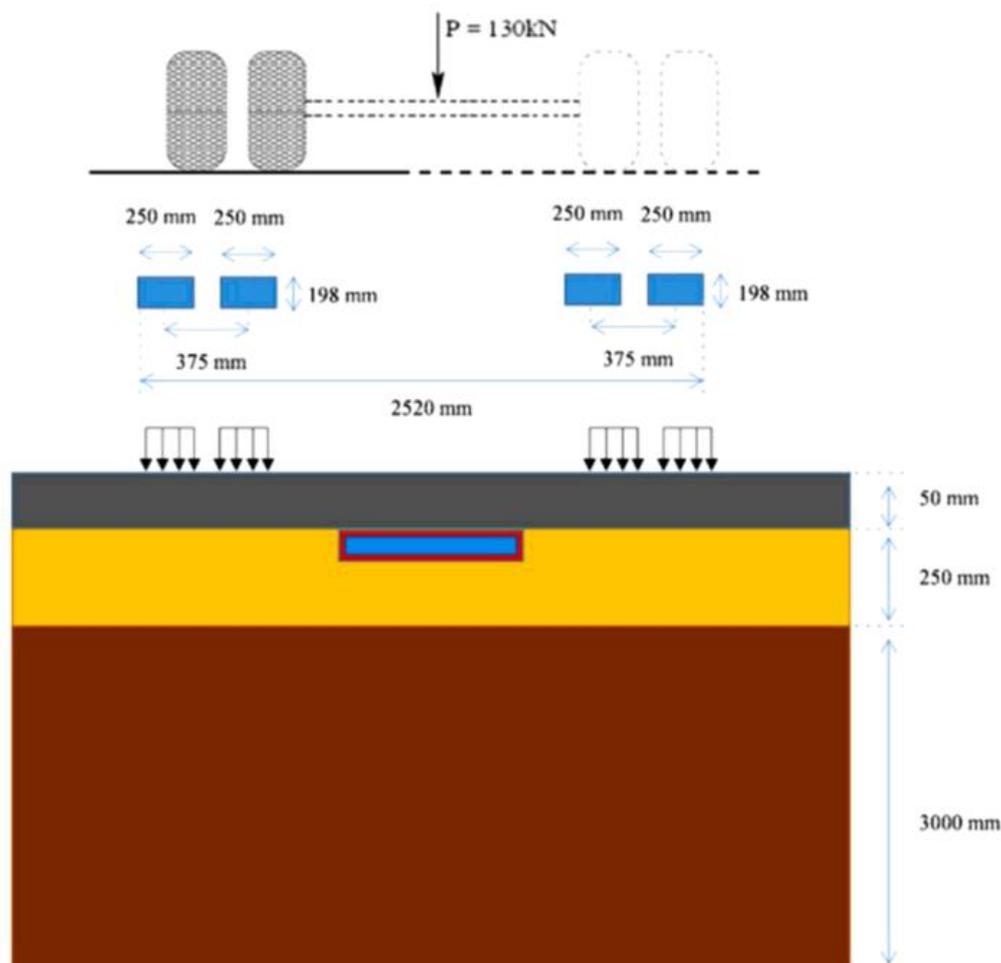


Fig. 29. Caso 1 del estudio de carga. [2]

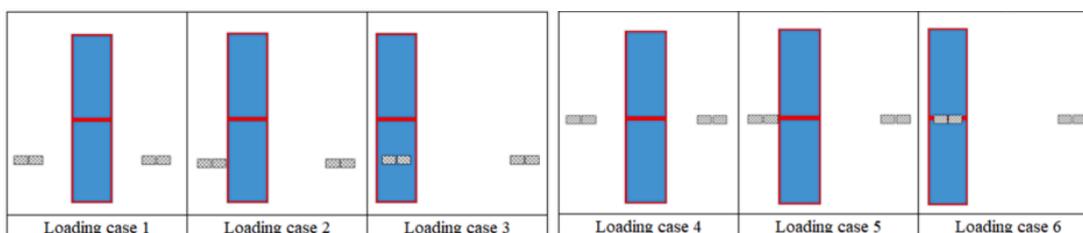


Fig. 30. Casos del estudio de carga. [2]

De cara a los criterios de análisis, se consideraron varios parámetros: la tensión máxima de tracción σ_1 , para evaluar el riesgo de fisuración de los materiales asfálticos; la deformación máxima en extensión ϵ_1 , utilizada como criterio de diseño de la fatiga para los materiales asfálticos; y las deformaciones verticales máximas ϵ_z , utilizadas como criterio de diseño para el terreno. Los valores límite de estos dos últimos se fijaron para un millón de ciclos de carga, lo que representa aproximadamente 27 años de tráfico con 100

vehículos pesados al día. Para las condiciones de las simulaciones se definieron los siguientes valores límite:

- Para el esfuerzo de tracción, el valor límite para los materiales asfálticos se sitúa en torno a 1 MPa, por ello, $\sigma_1 \leq 1$ MPa.
- Para la deformación por tracción, se define un valor límite ϵ_t que conduce al fallo por fatiga de los materiales asfálticos, en función del número de ciclos N . Para este caso se definió que $\epsilon_1 \leq 90 \mu\text{m}$.
- Para la deformación vertical, se define un valor límite ϵ_z en función del número de ciclos de carga N , con el fin de limitar las deformaciones permanentes. En este proyecto se calculó que $|\epsilon_z| \leq 560 \mu\text{m}$.

De cara a tener una visión general de cómo se distribuyen las tensiones y deformaciones a lo largo de la estructura, se presentan a continuación los resultados de la simulación del caso de carga 1 aplicado a la combinación del bloque de polietileno y la resina VA60.

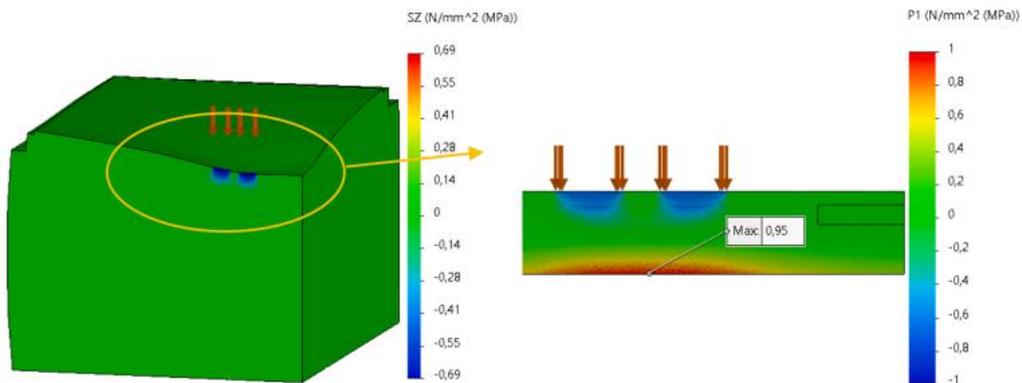


Fig. 31. Resultados de la tensión vertical ante el caso de carga 1. [2]

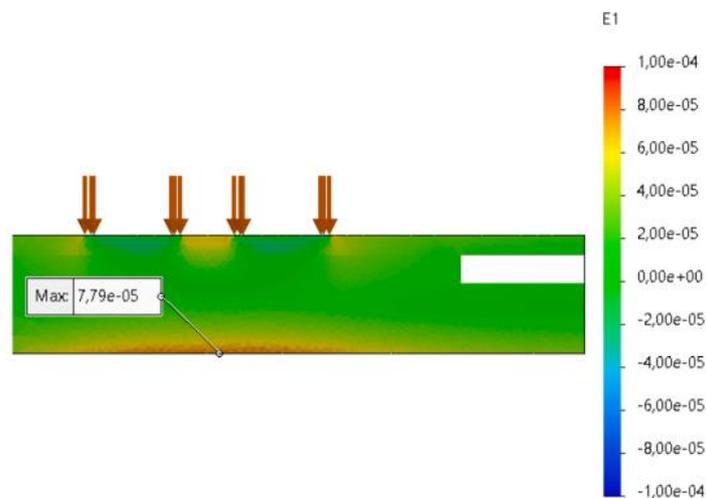


Fig. 32. Deformaciones resultantes ante el caso de carga 1. [2]

Por parte de las tensiones, mostradas en la Fig. 31, la capa de pavimento sufre en su zona superior, zona de contacto entre las ruedas y el pavimento, los esfuerzos máximos de compresión y en su parte inferior, en cambio, aparecen las zonas de máxima tracción, debidas a la flexión de la capa. No obstante, en ninguno de los casos se llega a superar el valor límite de 1 MPa. Siguiendo con el campo de deformaciones, sus resultados se representan en la Fig. 32, donde las zonas de mayor extensión vienen reflejadas en rojo. Su valor máximo se sitúa en la zona inferior del pavimento y es de 78 μm , lo que tiene sentido considerando que esa zona se encuentra traccionada. Al igual que ocurre con las tensiones, no se llega a superar el valor límite, siendo en este caso de 90 μm .

Los resultados de todas las simulaciones con la resina VA60 se resumen en la Fig. 33, que presenta los valores máximos y mínimos de los diferentes parámetros de tensión y deformación, para los 6 casos de carga. Para los casos de carga 3 y 6, en los que las cargas están justo por encima del bloque de la bobina, el efecto de la carga de tráfico es máximo y se obtienen deformaciones de tracción ϵ_1 elevadas en las capas próximas al bloque de 865 y 636 μm respectivamente. Estos valores superan el valor límite propuesto de 90 μm .

Loading case	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
σ_1 : Max principal tensile stress in AC (MPa)	0.954	1.03	2.85	0.959	1.03	2.98
ϵ_z : maximum vertical compressive strain in subgrade ($\mu\text{strains}$)	-287	-313	-349	-284	-311	-330
ϵ_1 : maximum extension strain in AC ($\mu\text{strains}$)*	80.0	130	865	77.6	123	636

Fig. 33. Valores máximos de tensión y deformación en la estructura del firme, con la resina VA 60. [2]

Los resultados de las simulaciones restantes, correspondientes al uso de resina de sellado Plastiroc, se muestran en la Fig. 34, para un bloque de bobina de polietileno, y Fig. 35, para un bloque de hormigón. En estos datos se puede ver mayor uniformidad del comportamiento de la estructura ante diferentes casos de carga, lo que implica un mejor comportamiento.

Loading case	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
σ_1 : Max principal tensile stress in AC (MPa)	0.95	0.95	1.01	0.96	0.95	0.93
ϵ_z : maximum vertical compressive strain in subgrade ($\mu\text{strains}$)	-274	-280	-301	-280	-279	-286
ϵ_1 : maximum extension strain in AC ($\mu\text{strains}$)*	77	77	80	77.5	77	74

Fig. 34. Valores máximos de tensión y deformación en la estructura del firme, con la resina Plastiroc. [2]

Loading case	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
σ_1 : Max principal tensile stress in AC (MPa)	0.943	0.939	0.914	0.951	0.940	0.862
ϵ_2 : maximum vertical compressive strain in subgrade (μ strains)	-270	-276	-260	-280	-273	-252
ϵ_1 : maximum extension strain in AC (μ strains)*	77	76	75	77	76	70

Fig. 35. Valores máximos de tensión y deformación en la estructura del pavimento, con la resina Plastiroc y el cajón de hormigón. [2]

8.2.2 Estudio 5: Ensayos realizados por A. Chabot and P. Deep

En estudios llevados a cabo por A. Chabot and P. Deep [9], se buscó analizar el comportamiento de las eRoad ante la carga del tráfico, donde para considerar las discontinuidades que la integración genera en la carretera se usó una herramienta 2D denominada M4-5nW. La aplicación de esta herramienta al diseño de una eRoad lleva al esquema mostrado en la Fig. 36.

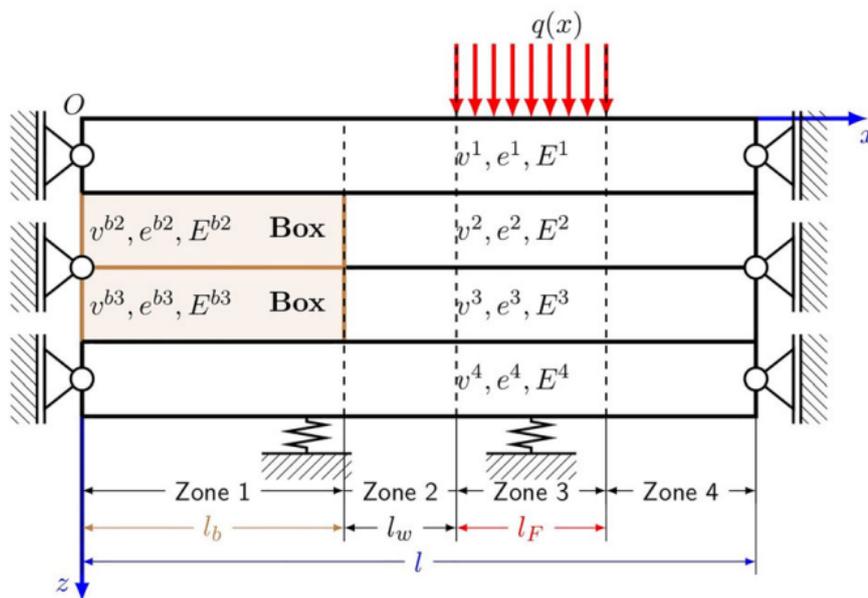


Fig. 36. Aplicación de la herramienta M4-5nW a una eRoad. [9]

Se llevó a cabo el análisis de dos estructuras diferentes, variando entre ellas las características de los materiales que se aplicaban en cada capa de la carretera. La primera de ellas, denominada como Caso 1, tiene capas de características muy similares, donde las tres primeras tienen un módulo elástico de 1000 MPa. El Caso 2, por su parte, tiene capas más variadas, donde el módulo elástico tiene un valor de 30000 MPa en las dos primeras capas. Las características de ambas estructuras se resumen en la Tabla. 7. [9]

Principales propiedades mecánicas				
Función	Caso 1		Caso 2	
	Espesor (mm)	E (MPa)	Espesor (mm)	E (MPa)
Capa 1	50	1000	50	30000
Capa 2	70	1000	70	30000
Capa 3	70	1000	70	1000
Capa 4	280	270	280	270
Bloque de la bobina	140	30000	140	30000

Tabla. 7. Resumen propiedades mecánicas. [9]

Las simulaciones se llevaron a cabo considerando la simetría de la estructura y aplicando una carga uniformemente distribuida de 800 kPa en una longitud de 20 cm, que representa la anchura de una rueda. Esta carga se aplicó en los primeros ensayos a 0,78 m del eje de simetría, como se puede observar en la Fig. 37.

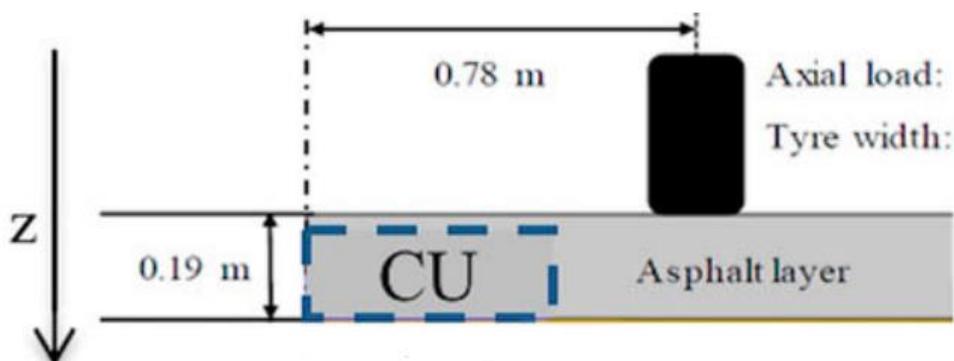


Fig. 37. Aplicación de la carga. [9]

Los resultados de este primer ensayo se muestran en la Fig. 38, donde se comparan las tensiones que aparecen entre las capas 1 y 2 para ambos casos y las tensiones entre las capas 2 y 3 para el Caso 2. Como se puede observar, a una distancia de aproximadamente 0,4 m, hay una variación en la tensión registrada causada por el borde donde el bloque de la bobina llega a su fin. En el Caso 1, esto se refleja en valores mucho más elevados que los registrados para el Caso 2, donde las propiedades de los materiales eran mucho más adecuadas.

Por su parte, el valle situado en torno a 0,8 m es causado por la carga distribuida en esa zona, donde la variación entre los resultados de ambos casos es mucho más despreciable. Esto se debe principalmente a que, en ambos casos, la zona alejada de la bobina carece de saltos entre materiales que generen zonas críticas, es decir, es una zona uniforme que tiene un mismo comportamiento. Esto no ocurre en la zona cercana a la bobina, sobre todo en el Caso 1, donde las propiedades entre los materiales de la bobina y el pavimento son tan diferentes.

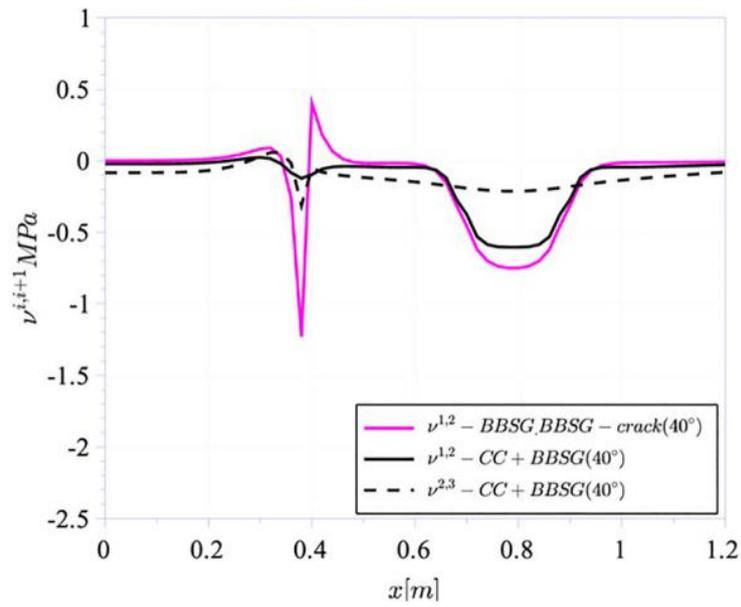


Fig. 38. Primera comparativa de resultados. [9]

Además de los resultados ya mostrados, en la Fig. 39 se pueden observar los datos obtenidos al aplicar la carga distribuida en una zona cercana al bloque de la bobina, resultando en valores de tensión más elevados. No obstante, la distribución general sigue siendo similar, con esos picos de tensión registrados en el Caso 1.

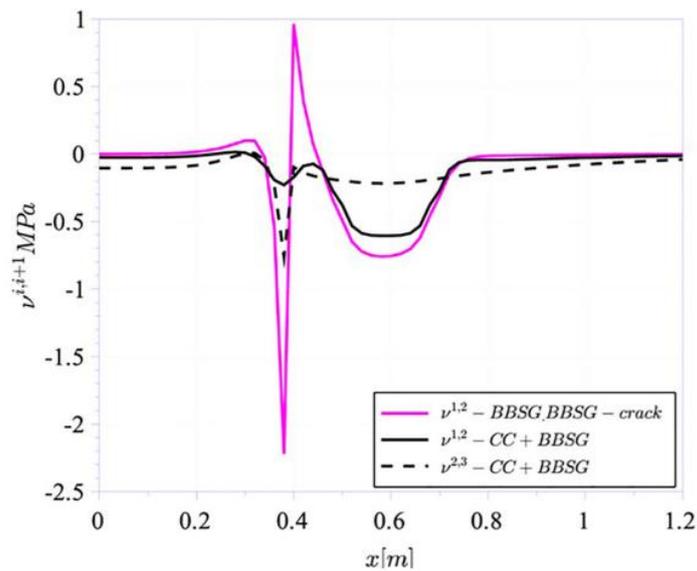


Fig. 39. Segunda comparativa de resultados. [9]

8.2.3 Estudio 6: Análisis del agrietamiento por fatiga

El estudio que se presenta en este apartado [10] tenía como objetivo principal analizar la fatiga en las eRoads, buscando comprobar si la integración de este tipo de sistemas de carga disminuía la vida útil o si la compatibilidad entre los diferentes elementos que la forman era adecuada. En el caso de las eRoad y las carreteras convencionales, la fatiga y los problemas relacionados a esta, como lo puede ser el agrietamiento, vienen causados por la aplicación repetida de cargas de tráfico que, aunque no superan los límites de los materiales que forman la estructura, a largo plazo conducen a una reducción de la capacidad de servicio de las carreteras.

Buscando comparar el comportamiento de las carreteras tradicionales con las eRoad y al mismo tiempo analizar los cambios que pueden influir en estas últimas, se usaron tres estructuras diferentes para llevar a cabo el estudio. Estos diseños se muestran en la Fig. 40.



Fig. 40. Sección transversal de la tRoad (a), eRoad con bloque compacto (b) y eRoad con bloque hueco (c). [10]

Como se observa en la figura superior, las capas y su espesor son idénticas entre las diferentes estructuras, siendo la única diferencia la integración del bloque compacto en el caso (b) y el bloque hueco en el caso (c). Las características de los materiales usados se pueden ver en la Tabla. 8.

Principales propiedades mecánicas			
Función	Espesor (m)	Densidad (N/m ³)	E (MPa)
Capa 1	0,05	24000	5500
Capa 2	0,14	23500	3500
Capa 3	0,30	23000	2000
Capa 4	6,00	21000	800
Bloque de la bobina	0,14	23000	25000

Tabla. 8. Propiedades mecánicas. [10]

En los diferentes análisis se aplicó una carga distribuida de $0,8 \text{ N/mm}^2$ en dos zonas de $0,2 \text{ m}$ que simulaban las ruedas del vehículo y la carga que estas transmiten a la carretera. Todo ello, aplicado para tres casos de carga diferentes que se muestran en la Fig. 41.

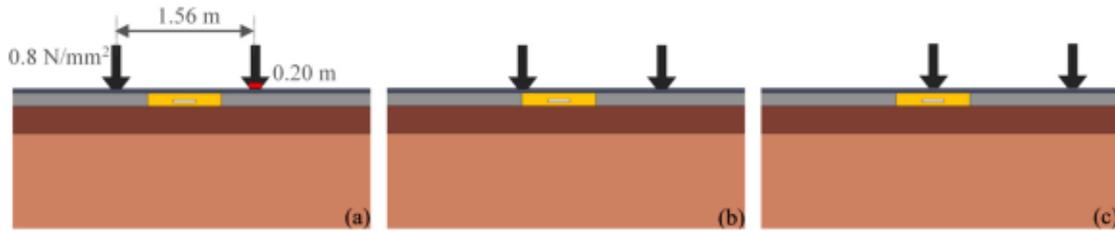


Fig. 41. Casos de carga: centrado (a), al borde (b) y sobre el bloque (c). [10]

Entre las primeras simulaciones realizadas, se encuentran los análisis a la distribución de las deformaciones para las diferentes estructuras, casos de carga y épocas del año, afectando estas últimas al valor del módulo de Young, con aumento en invierno y reducción en verano. Los resultados para el bloque hueco de muestran en la Fig. 42.

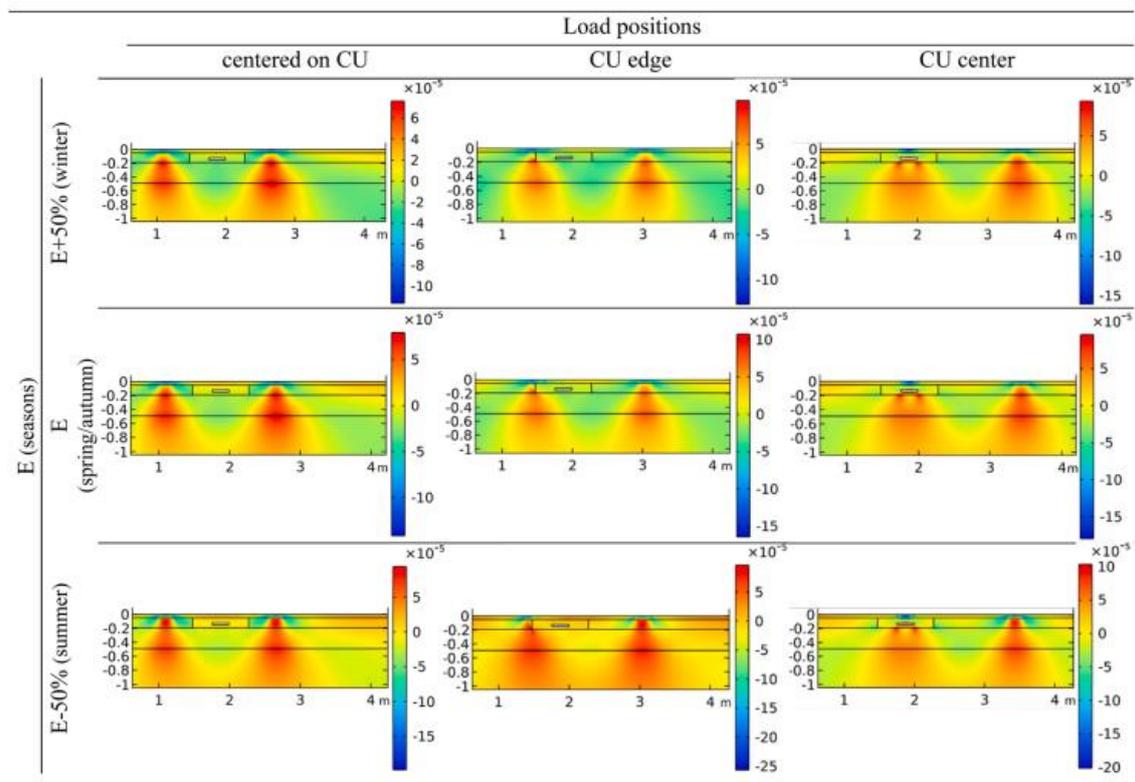


Fig. 42. Campos de deformaciones para el bloque hueco. [10]

Entrando más en detalle en los datos presentados anteriormente, la Fig. 43 resume la profundidad a la cual se da la deformación máxima, comparando, para la época de verano, los diferentes casos de carga y estructuras de la carretera. En esta imagen, se puede apreciar como el mayor valor de deformación tiene

una profundidad máxima de 0,19 m, siendo esta correspondiente a la aplicación de la carga en el borde del bloque hueco.

Depth of $\epsilon_{xx, \max}$ @E-50% (summer).

Depth of $\epsilon_{xx, \max}$ [m]		Load positions		
		centered on CU	CU edge	CU center
cross-sectional geometries	<i>t-road</i>	-0.116	-0.104	-0.117
	<i>e-road_solid CU</i>	-0.109	-0.113	-0.106
	<i>e-road_void CU</i>	-0.109	-0.19 (CU)	-0.12 (CU)

Fig. 43. Profundidad de las deformaciones máximas. [10]

De cara a los análisis a fatiga, la Fig. 44 muestra la cantidad de ciclos necesarios para llevar al fallo por fatiga a la sección crítica de cada una de las estructuras presentadas, mostrando resultados para cada uno de los casos de carga. Estos datos se obtuvieron considerando un agrietamiento que comienza en el fondo de la carretera y se propaga hacia arriba, siendo este el tipo de agrietamiento más probable y crítico en estas estructuras.

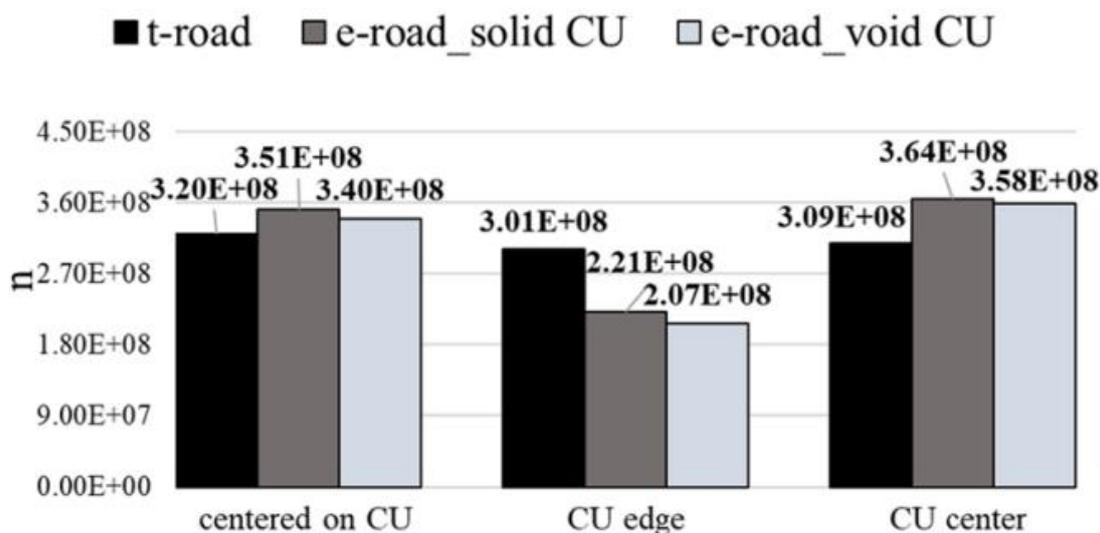


Fig. 44. Resultados de los análisis a fatiga. [10]

8.2.4 Estudio 7: Estudio del comportamiento mecánico realizado por Talita de Freitas Alves

Como bien se mencionaba en el apartado 7.2.3, Talita de Freitas Alves llevó a cabo un estudio, [3], sobre las eRoad y su comportamiento ante diferentes situaciones, realizando tanto análisis del comportamiento térmico como del mecánico. En este apartado se recogerán los resultados de este último, buscando ver como la carga del tráfico afecta a la integración del sistema de carga y a las tensiones y deformaciones registradas.

Para realizar estos análisis se usaron las estructuras ya mencionadas en el apartado 7.2.3, donde se mostraban tanto la configuración de la carretera francesa como de la brasileña. En este caso, las propiedades que caracterizan a los materiales son sus propiedades mecánicas mostradas en las tablas inferiores, destacando principalmente su módulo de Young.

Principales propiedades mecánicas de la estructura francesa			
Función	Material	Densidad (kgm ⁻³)	E (MPa)
Capa 1	BBSG	2480	13700
Capa 2	GB	2350	12200
Capa 3	GB	2350	12200
Capa 4	Terreno	2200	120

Tabla. 9. Principales propiedades mecánicas de la estructura francesa. [3]

Principales propiedades mecánicas de la estructura brasileña			
Función	Material	Densidad (kgm ⁻³)	E (MPa)
Capa 1	CBUQ	2450	9140
Capa 2	BGS	1700	350
Capa 3	Terreno	2200	120

Tabla. 10. Principales propiedades mecánicas de la estructura brasileña. [3]

Principales propiedades mecánicas del sistema de carga			
Función	Material	Densidad (kgm ⁻³)	E (MPa)
Railes	Mezcla de metales	7800	210000
Sellado	EPDM	1060	5
Sellado	VA-60	1080	4,34

Tabla. 11. Principales propiedades mecánicas del sistema de carga. [3]

De cara a la aplicación de la carga, se consideró una condición de uso ideal en términos de circulación del vehículo, lo que significa que no había desalineación lateral entre el centro de la CU y el del vehículo. El eje de la rueda estaba alejado del eje de simetría de la calzada aproximadamente 0,9 m, en sentido transversal. Las condiciones de tráfico se definieron como una carga de doble rueda con una presión unitaria de 0,662 MPa (32,5 kN por rueda) que se desplazaba a 60 km/h.

Para investigar los parámetros mecánicos de forma más detallada se analizaron una serie de puntos estratégicos, que se corresponden con las localizaciones comúnmente utilizadas para los análisis centrados en los modelos de roderas y fatiga. En el caso de la eRoad brasileña, se añadió un par de puntos extra de análisis debido a la presencia de una capa de base granular entre la capa bituminosa y el firme. La posición exacta de estos puntos, así como la sección transversal de las estructuras y la zona de aplicación de la carga puede verse en la Fig. 45.

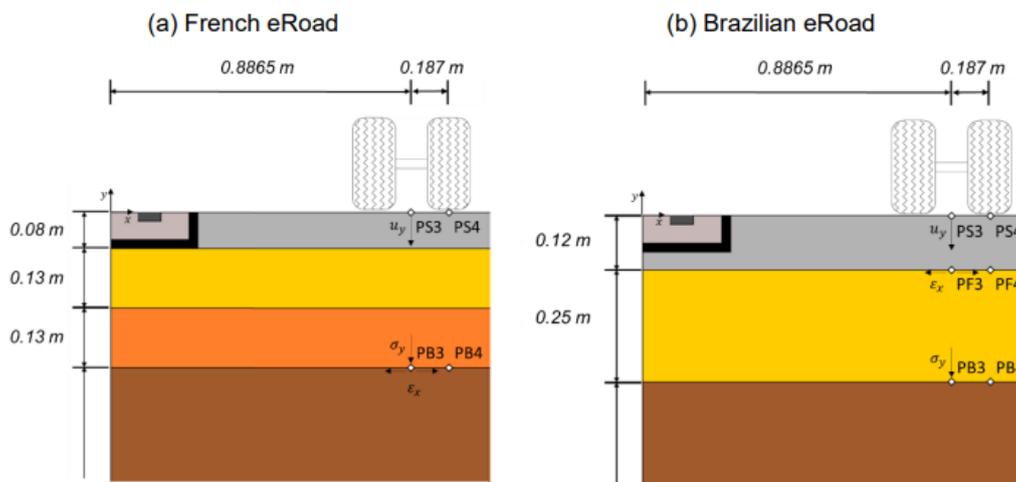


Fig. 45. Esquema de las dos carreteras usadas en los análisis. [3]

Los primeros análisis realizados, trataron a las estructuras de forma más global, ya que se buscaba comprobar en un primer momento la veracidad de los datos aportados por dos programas de cálculo, Cast3M y ViscoRoute, y comparar sus resultados. Para ello, se tomó a la tRoad francesa, es decir, la estructura sin la integración del sistema de carga, y se analizaron los desplazamientos en el fondo de cada una de las capas que forman la carretera, correspondiéndose a unas profundidades de 8, 21 y 34 cm.

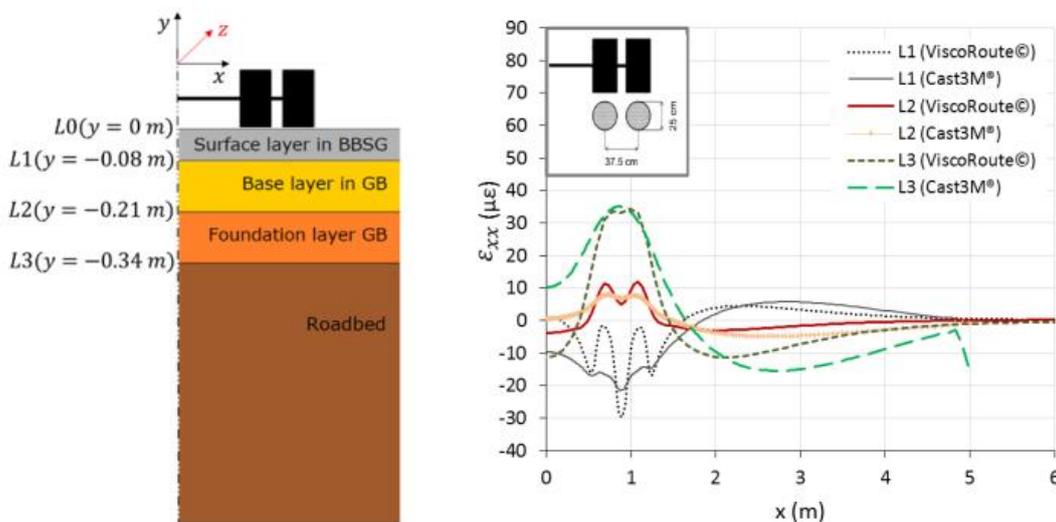


Fig. 46. Desplazamientos de las capas de la estructura francesa. [3]

En el gráfico mostrado en la Fig. 46 se observa la distribución de las deformaciones de la carretera francesa ante las cargas de tráfico anteriormente descritas. En este caso, al haber realizado análisis con diferentes programas de cálculo y habiendo definido en cada uno de ellos unas condiciones que, aunque similares, tenían aspectos alejados el uno del otro, ha llevado a unas distribuciones de la deformación que varían considerablemente entre los diferentes análisis. No obstante, como el principal objetivo de estos primeros

análisis eran los valores máximos de deformación calculados bajo el eje de las ruedas, las divergencias se consideraron mínimas.

De estos primeros análisis, como era de esperar y como se ha visto anteriormente, la zona de aplicación de la carga del tráfico supone una zona que requiere ser analizada. En este caso, acaba siendo la más crítica de la estructura, ya que se está ante una carretera tradicional, donde no se han supuesto daños puntuales como grietas o la integración del sistema de carga de una eRoad. Tras estos análisis, comenzaron a estudiar de forma más detallada el comportamiento de las diferentes estructuras, centrándose principalmente es los datos aportados por los puntos estratégicos de la Fig. 45.

En la Fig. 47 se representan las evoluciones verticales del desplazamiento para los puntos situados en la superficie de la carretera, tanto para la estructura francesa, mostrada a la izquierda, como para la brasileña, correspondiente a los gráficos de la derecha. Para ambas carreteras, el punto PS3 está situado por debajo del centro simétrico de las dos ruedas y el punto PS4 está situado en el eje central de la rueda más externa en la dirección transversal de la calzada.

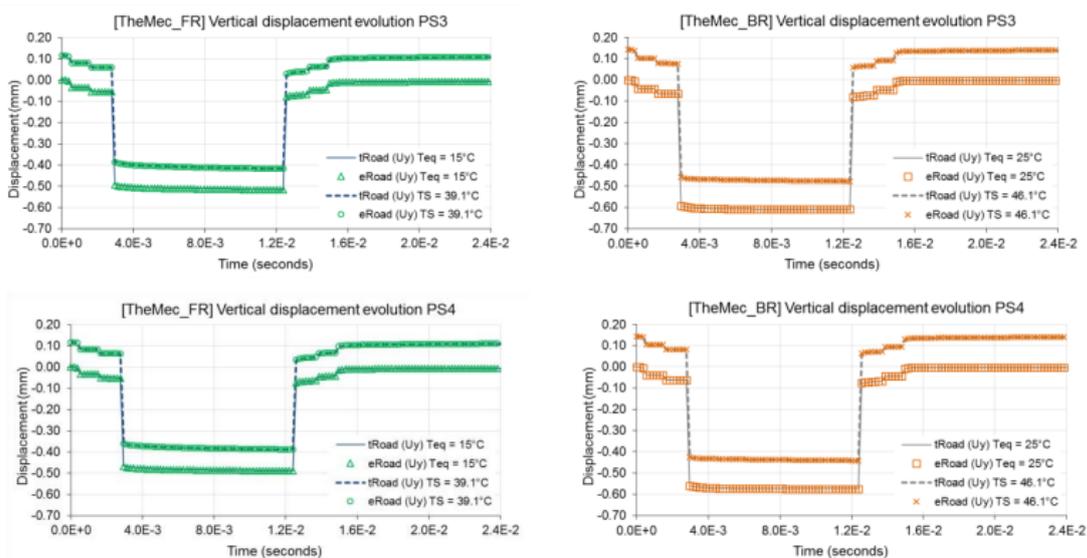


Fig. 47. Desplazamientos de los puntos PS3 y PS4. [3]

En un primer vistazo, se puede observar como para una misma temperatura, las curvas de la eRoad y tRoad se superponen, ocurriendo esto para ambos puntos de análisis y en ambas carreteras. Esto se debe principalmente a que los puntos analizados están lejos de la zona donde se integra la unidad de carga, por lo que, se haya dado o no la integración, la zona analizada no tiene por qué verse afectada. Los valores de desplazamiento más altos fueron de -0,5 mm, tanto en el punto PS3 como en el PS4, para la carretera francesa y -0,6 mm para la brasileña, volviendo a sus valores iniciales tras dejar de aplicar la carga.

En la Fig. 48 se muestran los desplazamientos verticales en la totalidad de la sección transversal de las carreteras, reflejándose solo la mitad por simetría respecto del eje central de la estructura. En ellas se

observa la similitud en los desplazamientos de la eRoad y tRoad en las zonas alejadas de la unidad de carga y como sus valores difieren entre ellos en la zona más cercana a esta. En la zona cercana a la bobina, donde la integración de nuevos materiales ha generado una zona crítica, se observa un desfase entre el centro simétrico de las carreteras y la trayectoria de la carretera convencional, con un valor de 0,29 mm en la eRoad francesa y de 0,63 mm en la eRoad brasileña.

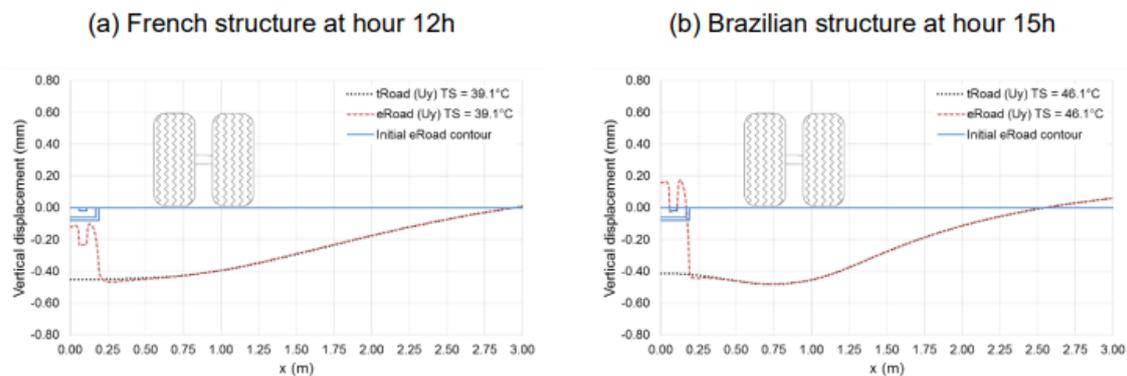


Fig. 48. Desplazamientos verticales de la línea de rodadura para ambas carreteras. [3]

En la Fig. 49, se representan las evoluciones de la deformación horizontal en los puntos PB3 y PB4 de la estructura francesa situados a una profundidad de 0,34 m desde la superficie y en los puntos PF3 y PF4 de la estructura brasileña cuya profundidad es de 0,12 m.

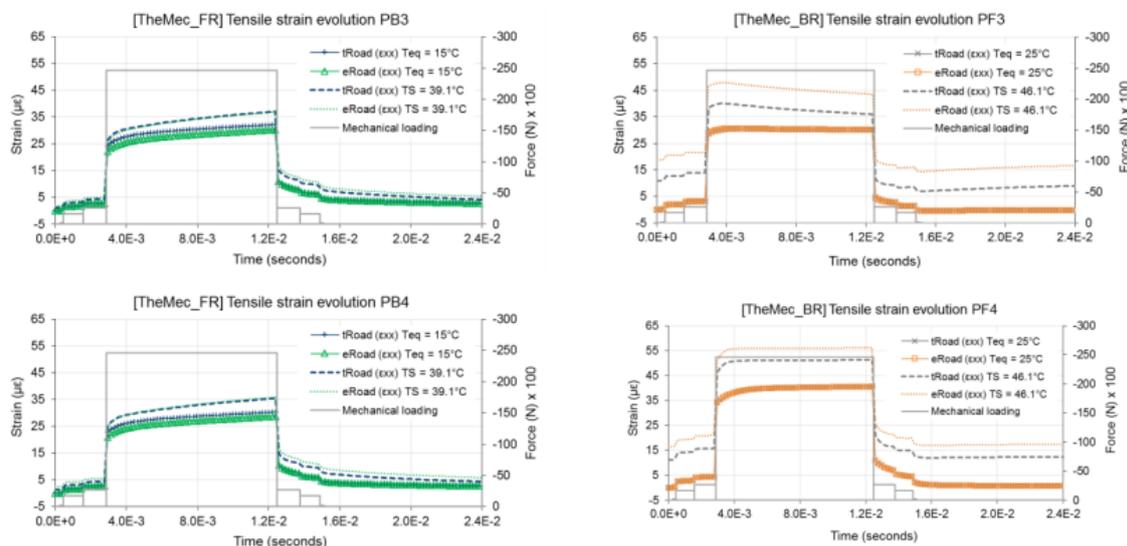


Fig. 49. Deformaciones horizontales en ambas carreteras. [3]

En los gráficos se puede apreciar como la estructura del pavimento francés soportó niveles muy similares de deformación por tracción en los puntos PB3 y PB4 para los diferentes casos simulados. De nuevo, una indicación de que, para una estructura robusta como el pavimento flexible francés, no se observan diferencias significativas en la evolución de la deformación en la zona inferior a la aplicación de la carga.

En el caso del pavimento brasileño, las curvas Teq estaban superpuestas, mientras que las curvas TS mostraban magnitudes de deformación diferentes y superiores. Al igual que en la evolución del desplazamiento, esta diferencia entre las curvas Teq y TS se explica principalmente por la deformación inicial distinta de las curvas TS debido al historial de deformación de los ciclos de carga térmica. La Fig. 50 muestra el pico de deformación horizontal a tracción obtenido en cada punto de análisis para ambas estructuras y temperaturas ambiente.

French structure	Point PB3		Point PB4	
	tRoad	eRoad	tRoad	eRoad
T _{eq} = 15°C	32.2	30.3	30.3	28.7
TS = 39.1°C	37.1	36.9	35.5	35.9
Brazilian structure	Point PF3		Point PF4	
	tRoad	eRoad	tRoad	eRoad
T _{eq} = 25°C	30.5	30.7	40.7	40.6
TS = 46.1°C	40.0	47.9	51.3	56.2

Fig. 50. Picos de deformación horizontal. [3]

En la Fig. 51 se muestra la distribución de la deformación en el interior de las carreteras objeto del análisis, donde se puede observar concentración de la deformación cerca de las proximidades de la unidad de carga. La variación de los valores sobre el eje x es mayoritariamente uniforme a lo largo de la sección, siendo sobre el eje y donde mayor impacto genera la carga del tráfico. No obstante, la capa de rodadura y la zona crítica cercana a la unidad de carga son las que registran una mayor deformación, que, a medida que aumenta la profundidad, va viendo su valor disminuido.

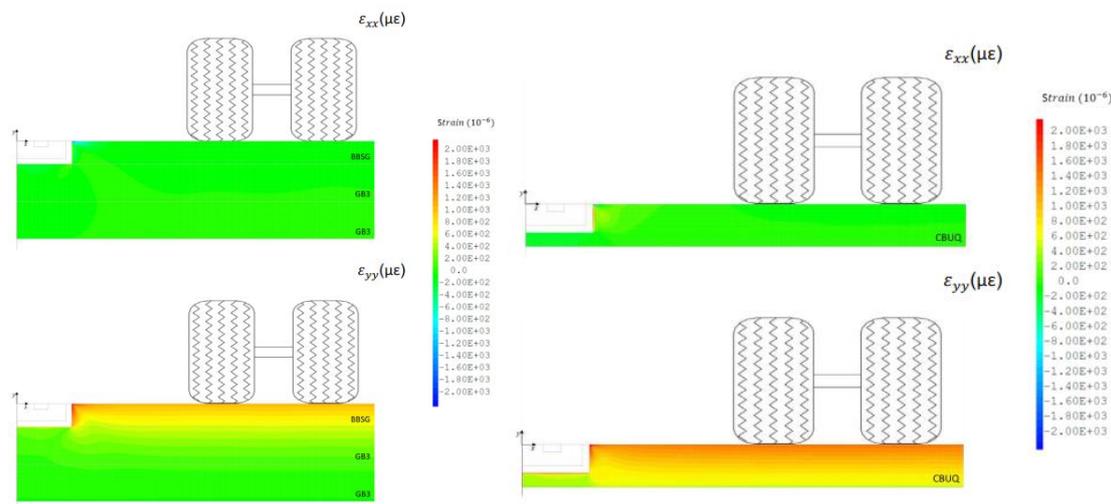


Fig. 51. Campos de deformaciones. A la izquierda carretera francesa y a la derecha la brasileña. [3]

En la Fig. 52 se representan cuatro puntos situados en las proximidades de la unidad de carga. Los puntos P1 a P3 están a 5 mm de la interfaz de la unidad de carga y la capa de rodadura, en la dirección transversal. Analizados sobre el eje y, el punto P1 está situado en la superficie de la estructura ($y = 0$ m), el punto P2 y P3 están cerca de la esquina de la unidad de carga ($y = -0,06$ m, $y = -0,08$ m respectivamente). Por su

parte, el punto P4, que se encuentra por debajo de la unidad de carga, en la estructura francesa está situado en la capa bituminosa de base (GB3) y en la estructura brasileña pertenece a la superficie bituminosa de rodadura (CBUQ).

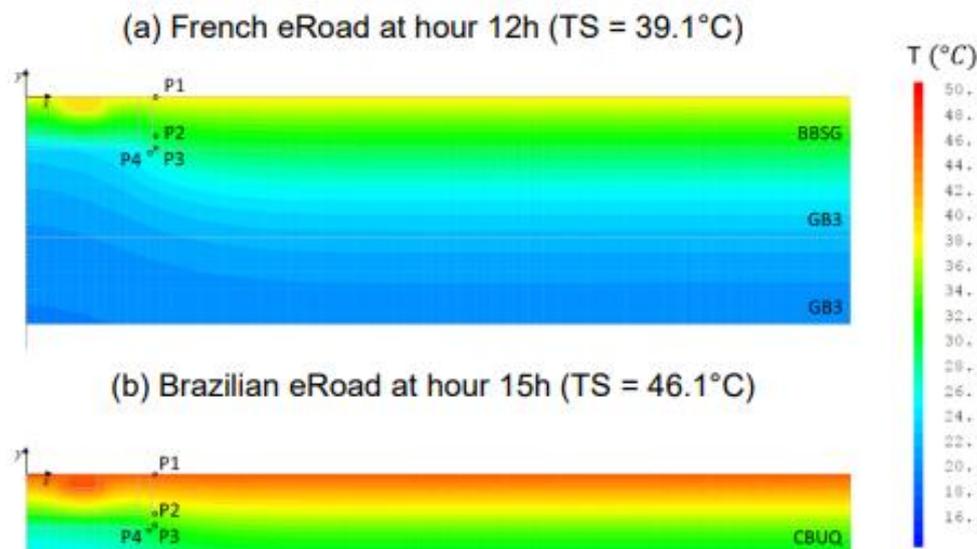


Fig. 52. Situación de los puntos de análisis P1, P2, P3 Y P4. [3]

La evolución de la deformación en estos puntos se representa en la Fig. 53. Como las deformaciones horizontales y transversales tenían magnitudes muy diferentes, los gráficos representan en el eje izquierdo, en color negro, la deformación horizontal y en el eje derecho, en color rojo, se representa la deformación vertical. Según los gráficos, en el caso de la estructura del pavimento francés, todos los puntos estaban sometidos a una deformación por compresión en sentido horizontal y a una deformación por tracción en sentido vertical.

En la estructura brasileña, en cambio, la deformación horizontal no siguió la misma tendencia en todos los puntos. En el punto P1, se observan deformaciones horizontales compresivas, con magnitudes dos veces inferiores a las logradas en la estructura francesa, a pesar de soportar una temperatura más elevada en la superficie. A medida que aumentaba la profundidad, los puntos P2 y P3 mostraron deformaciones horizontales de tracción debidas a cargas térmicas que eran comparables a los niveles de deformación observados en la parte inferior de la capa bajo el eje de la rueda. Este es un indicio importante de que estas zonas pueden ser susceptibles a la fatiga simplemente debido a las fluctuaciones diarias de temperatura. En el punto P4, por su parte también registró deformaciones horizontales compresivas.

De cara a la deformación vertical desarrollada en la estructura brasileña, todos los puntos mostraron deformación por tracción, y en magnitudes muy similares a las mostradas en los puntos de la estructura francesa.

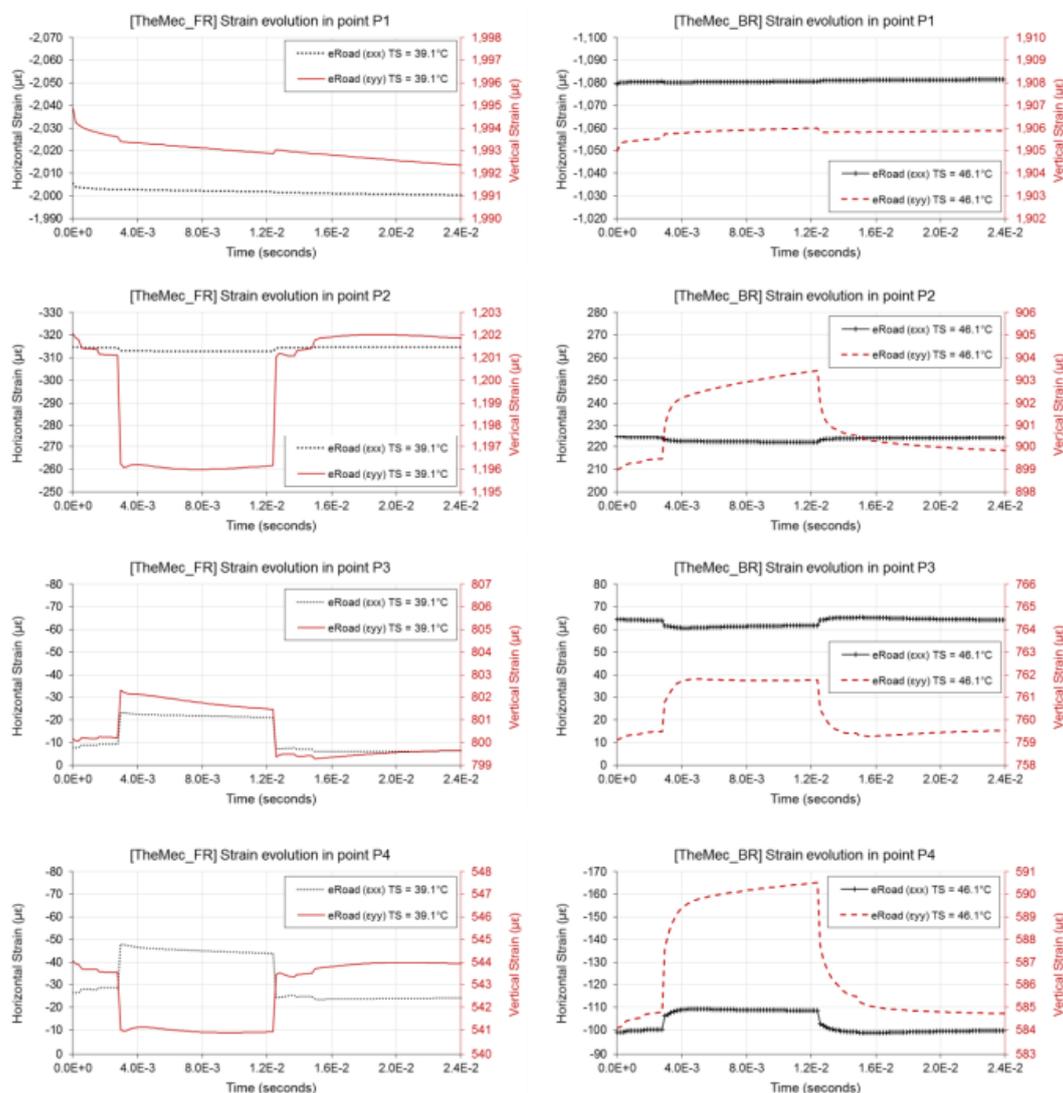


Fig. 53. Deformaciones registradas en los puntos P1, P2, P3 Y P4. [3]

De cara a las tensiones registradas a lo largo de las carreteras, en la Fig. 54 se representan las evoluciones de las tensiones verticales en los puntos situados en la parte superior del terreno. El punto PB3 está situado debajo del centro simétrico de las dos ruedas y el punto PB4 está situado en el eje central de la rueda más externa, en la dirección transversal de la calzada.

A partir de los gráficos, se observa que el esfuerzo de compresión máximo en la parte superior del terreno se obtuvo por debajo del centro simétrico del eje de las dos ruedas (puntos PB3) en todos los casos. Del mismo modo, las curvas comenzaron con valores cero de tensión, alcanzaron niveles máximos de tensión de compresión cuando se aplicó el pulso de carga mecánica máxima y volvieron a cero una vez que cesó la carga. Además, al tratarse de puntos alejados de la zona de integración de la unidad de carga, las curvas tRoad y eRoad se superpusieron para todos los escenarios climáticos y tipologías de carretera.

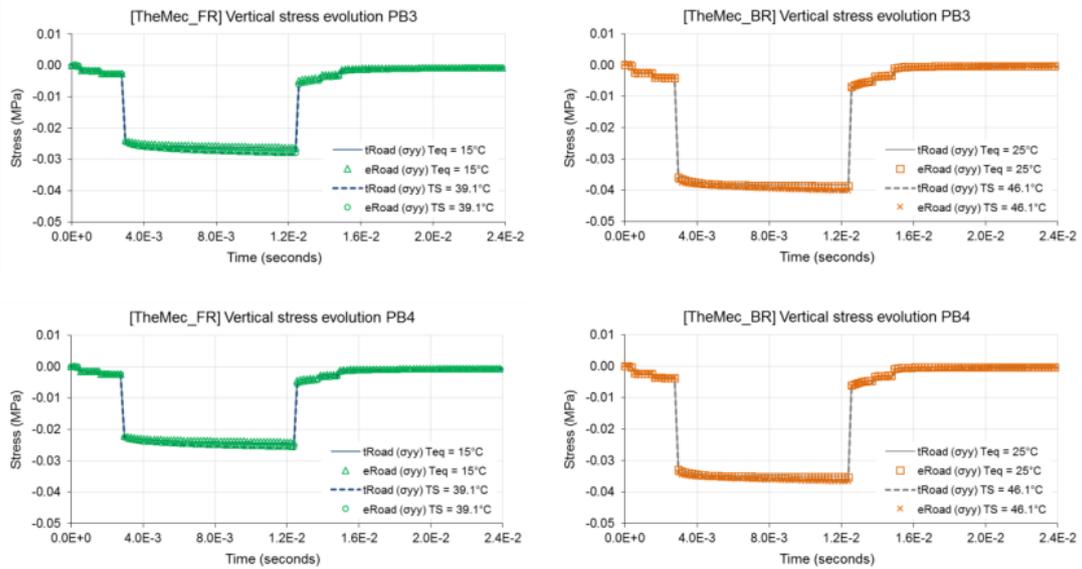


Fig. 54. Deformaciones registradas en los puntos P1, P2, P3 Y P4. [3]

No obstante, en términos de campos de tensión dentro de la estructura, se observa una concentración local de tensión cerca de la unión entre la unidad de carga y la carretera, pudiendo verse esto en la Fig.55. Además, se aprecia que la tensión horizontal en las eRoads francesa y brasileña sigue un patrón similar. Cerca de la interfaz de la unidad de carga, existe una zona sin generación de tensiones, en forma de triángulo rectángulo invertido. En cuanto a la tensión vertical, se observa que la tensión inducida por el tráfico se desarrolla lejos de la unidad de carga en condiciones ideales de uso y que la concentración de tensión cerca de la superficie de esta es resultado del ciclo de carga térmica aplicado.

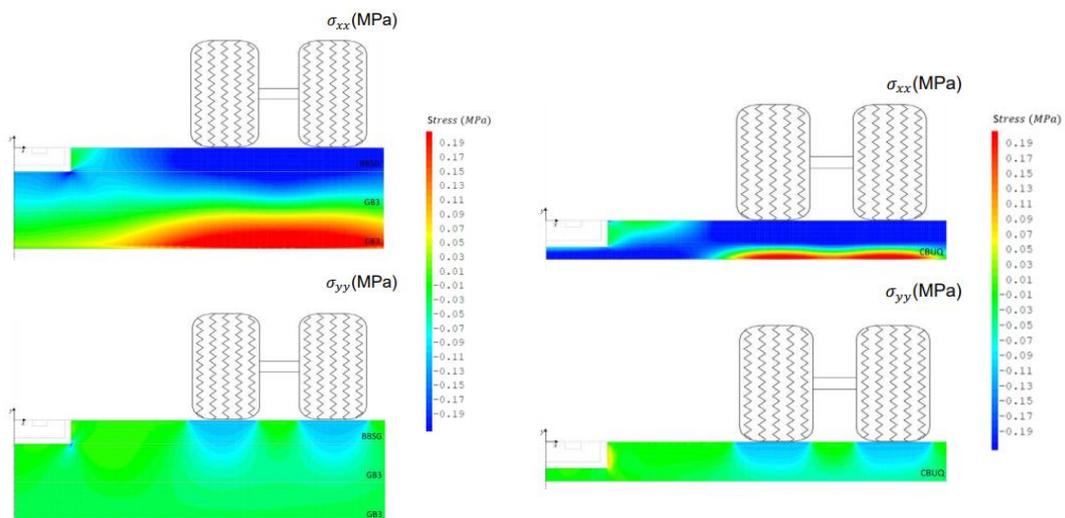


Fig. 55. Campos de tensión en la carretera francesa y brasileña respectivamente. [3]

En la Fig. 56 se representa la evolución de la tensión en los puntos P1, P2, P3 y P4. En el eje derecho, en color rojo, se representa la tensión vertical y los límites varían de 0,4 a -0,4 MPa en pasos de 0,1 MPa. En

el eje izquierdo, en color negro, se representa la tensión horizontal y los límites varían de 0,8 a -0,8 MPa en pasos de 0,2 MPa. La tensión resultante de la carga representada corresponde a las 12h en el pavimento francés y a las 15h en el pavimento brasileño.

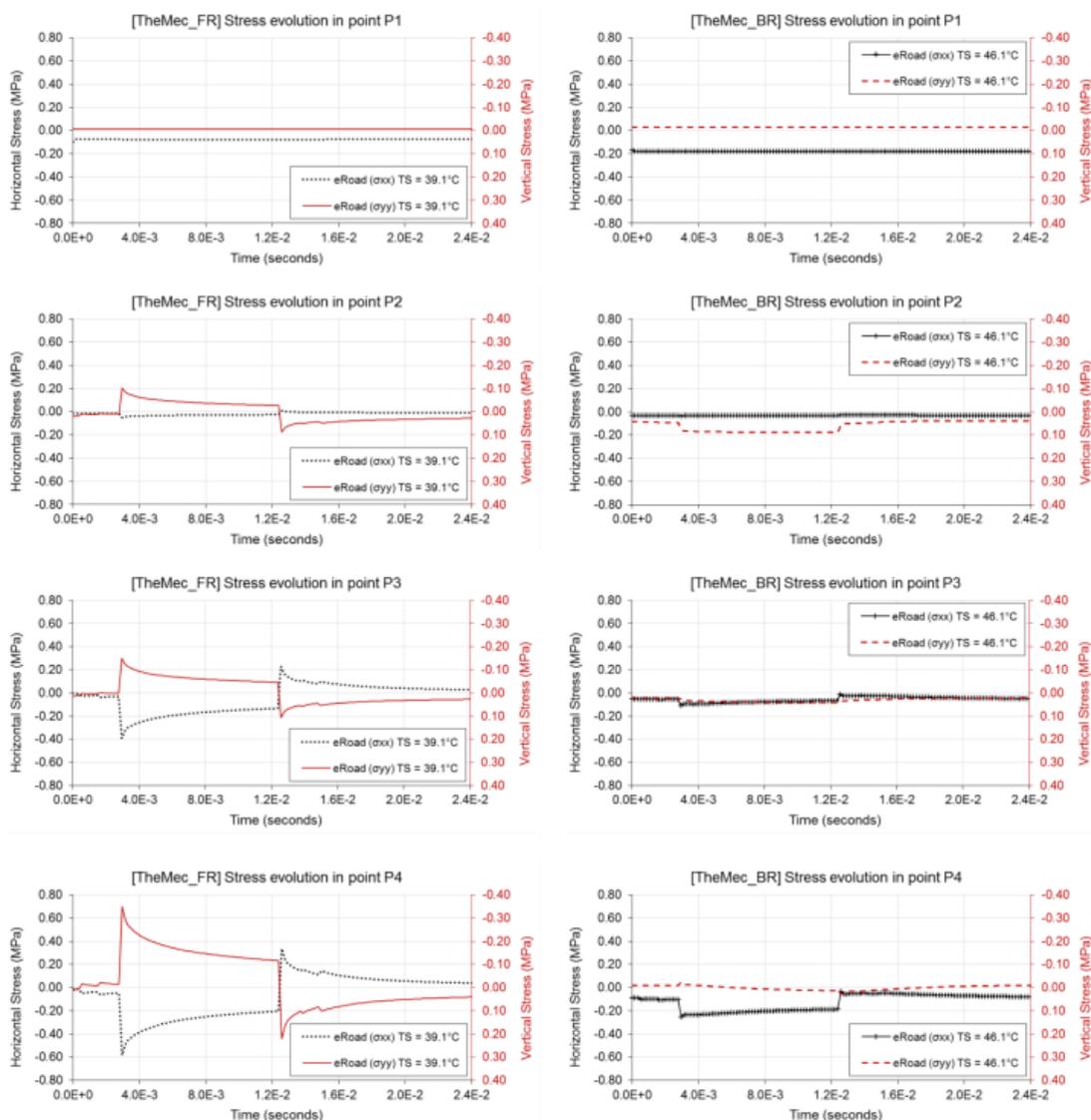


Fig. 56. Tensiones registradas en los puntos P1, P2, P3 y P4. [3]

A partir de estos gráficos, se puede observar que la carga inducida por el tráfico tuvo un mayor impacto en la evolución de la tensión en la eRoad francesa en comparación con la eRoad brasileña. Los puntos P3 y P4 en el pavimento francés, mostraron picos de tensión tanto en dirección vertical como horizontal cuando se aplicó la carga máxima. Durante la aplicación estática de cada impulso de carga, se observa la relajación de la tensión en los puntos, una buena indicación de que el comportamiento viscoelástico de las mezclas bituminosas se había tenido en cuenta en el modelo.

8.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

De los datos de los diferentes estudios se puede concluir que la zona más crítica de la estructura depende en gran medida de donde se aplica la carga. Es cierto que las discontinuidades generadas en la integración del bloque de la bobina o los nuevos materiales usados para la integración generan zonas que teóricamente suponen mayor riesgo, pero una aplicación de la carga alejada de estas zonas, como se puede ver en el campo de tensiones de la Fig. 31, no afectaría prácticamente al bloque de la bobina.

Más concretamente, siguiendo con los resultados del Estudio 4, se puede ver como las diferentes estructuras propuestas tienen para el mismo caso de carga 1, unos resultados muy similares. Esto se muestra en la Tabla. 12, donde la variación de los resultados ante diferentes estructuras es mínima.

Caso de carga 1			
Valores máx.	Bloque polietileno + VA60	Bloque polietileno + Plastiroc	Bloque hormigón + Plastiroc
Tensión (MPa)	0,954	0,95	0,943
Compresión (μm)	287	274	270
Tracción (μm)	80	77	77

Tabla. 12. Comparativa resultados Estudio 3, caso de carga 1. [2]

No obstante, es difícil asegurar un caso de carga favorable durante toda la vida útil de la carretera, siendo más probable encontrar casos como los mostrados en los Estudios 4, 5 y 6, donde los vehículos pasan cerca o por la parte superior de la zona del bloque de la bobina. Es por ello que es necesario observar estos casos críticos y realizar diseños acordes.

Entre los parámetros que afectan a la integración del sistema de carga, el módulo de Young de los materiales es quizás el que más influencia tiene, dejando ver como con valores más altos se consigue que las tensiones y deformaciones registradas sean menores. Esto se aprecia claramente en la comparativa hecha en la Fig. 39, donde se mostraban, para el Estudio 5, las tensiones resultantes de aplicar una carga cerca del bloque de la bobina.

De las funciones ahí mostradas, se identifica en morado las tensiones resultantes en la estructura constituida de dos primeras capas de módulos de 1000 MPa y en negro continuo, en cambio, los resultados de la estructura donde las primeras dos capas contaban con un módulo de 30000 MPa. Se puede observar como la tensión pasa de -0,75 a -0,5 MPa en la zona de aplicación de la carga y como, en el borde del bloque de la bobina las tensiones de tracción se reducen de 1 MPa a tener un valor casi nulo y las tensiones de compresión pasan de un valor de -2,25 MPa a rondar los -0,25 MPa.

Dando veracidad a lo anteriormente dicho, los resultados del Estudio 4 dejan claro el peligro que puede llegar a generar la mala elección de material. Por ejemplo, en la estructura que usa resina de sellado VA

60 con un módulo de 4,34 MPa, los valores tensionales máximos de la estructura llegan casi a los 3 MPa. Estos resultados, posteriormente, se ven drásticamente mejorados al cambiar a la resina Plastiroc, con un módulo de 5662 MPa, haciendo que los valores tensionales máximos registrados desciendan hasta rondar 1 MPa.

Del mismo modo, los datos aportados muestran que cuando existe una gran diferencia de módulos entre los elementos embebidos y los materiales de la calzada, se generan localmente niveles de tensión o deformación elevados, que podrían conducir al fallo. Por el contrario, con materiales de propiedades mecánicas similares, no se observan tales concentraciones de tensiones o deformaciones, y los riesgos de deterioro son muy reducidos.

Este aspecto se aprecia en los resultados del Estudio 4 para la combinación con Plastiroc mostrada en las Fig. 34 y 35. En ella se ven diferencias muy pequeñas entre los 6 casos de carga, lo que indica que no hay concentración de tensiones o deformaciones cuando las cargas se aplican directamente sobre las bobinas (casos 3 y 6). Esto puede explicarse por la escasa diferencia entre los módulos de la resina (5660 MPa), de la capa de rodadura asfáltica (5400 MPa) y del bloque de la bobina (2300 MPa). Por el contrario, si vemos los resultados del mismo estudio, pero en el caso de la resina VA 60, se detecta una gran diferencia en los casos 3 y 6, lo que apunta a concentraciones de tensiones por la poca similitud de las propiedades de la resina con las del resto de los materiales.

Analizando los resultados del Estudio 6, donde se daba prioridad a analizar el comportamiento a fatiga de las eRoad, se ve como la vida útil de este tipo de carreteras se ve mayormente afectada por la zona donde se aplica la carga. No obstante, se puede afirmar que la poca similitud entre los materiales que forman la estructura, teniendo el bloque de la bobina propiedades ampliamente mejores, genera zonas críticas causantes de una reducción de la vida útil. Esto se ve claramente en la Fig. 44, donde para los casos de carga centrada en la bobina, las estructuras que cuentan con el sistema de carga obtienen una vida útil mayor respecto de la carretera tradicional, pero cuando la carga se aplica en el borde del bloque de la bobina, la vida útil de las eRoad es considerablemente menor que la de la carretera tradicional.

Aunque los análisis del Estudio 7 no buscaban el análisis a fatiga, los resultados de la Fig. 56 dejan ver aumentos inmediatos y locales de las tensiones, que, junto a la posibilidad de convertirse en cargas cíclicas por el paso constante del tráfico, llevan a ver el peligro que la fatiga puede llegar a causar en estas estructuras. Entre los daños, por ejemplo, puede aparecer el desprendimiento de la unidad de carga de la capa asfáltica cerca de la esquina de la unidad. Por ello, es esencial tener en cuenta la geometría de la unidad de carga y el perfil del pavimento existente en las primeras fases del diseño, a fin de evitar la creación de zonas críticas para la concentración de tensiones.

Un claro ejemplo de esto son las esquinas en ángulo recto que queden entre dos capas de pavimento diferentes y que a su vez hacen esquina con la unidad de carga, como se muestra en la Fig. 55. En ella se

ve como, para ambas carreteras, la zona de tránsito entre materiales y la geometría decidida en el diseño no han ayudado a minimizar la elevación puntual del valor de las tensiones.

En los resultados de los desplazamientos de la carretera francesa y brasileña de la Fig. 48 del Estudio 7, se ve como la aplicación de la carga afecta, aunque sea de manera despreciable, al desplazamiento de la unidad de carga. Mas concretamente, para el caso de la carretera francesa, la capa superior se acaba situando a una profundidad mayor, y para la carretera brasileña, en cambio, esta acaba sobrepasando la cota cero. Estos valores absolutos por sí solos pueden no desencadenar procedimientos de mantenimiento de la gestión del pavimento en carreteras convencionales, pero en el caso específico de las eRoads pueden indicar problemas en la conexión entre los elementos que forman el sistema de carga.

En general, los cuatro estudios analizados llevan a una conclusión clara, siendo evidente que mejores propiedades, como lo es un mayor módulo de Young, o una mayor similitud entre los diferentes materiales, hará que no solo se reduzcan las deformaciones y tensiones registradas, si no que se genere una estructura más homogénea con menos zonas críticas.

9 EFICIENCIA DEL SISTEMA DE CARGA

Este apartado muestra la importancia que los materiales y la identificación de las pérdidas tienen sobre la eficiencia de carga de las eRoad, comenzando con las generalidades y siguiendo después con datos de ensayos y su análisis.

9.1 GENERALIDADES

La eficiencia de la transferencia inalámbrica de potencia es uno de los retos principales para un sistema IPT y sus valores normalmente oscilan entre el 70% y el 95%, siendo las principales causantes las pérdidas resistivas de las bobinas conductoras, las pérdidas por corrientes parásitas e histéresis en los núcleos de ferrita y las pérdidas por conmutación en los convertidores electrónicos de potencia de alta frecuencia. Además, tras integrar la tecnología IPT en las carreteras reales, otra fuente potencial de pérdida de potencia puede ser la pérdida de potencia electromagnética (EM) causada en los medios físicos que atraviesan los flujos magnéticos de alta frecuencia. [11]

Esta última es quizás en la que menos se ha profundizado, pero puede tener un impacto importante en la funcionalidad resultante del sistema integrado. Su uso en otras aplicaciones, como la recarga de baterías de sensores integrados en la monitorización del estado estructural de infraestructuras civiles, dan a conocer que los medios dieléctricos del hormigón, el suelo y las humedades podrían absorber parte de la energía EM. Por ello, es de esperar que la tecnología de carga IPT integrada en las estructuras del pavimento incluya algunas de estas pérdidas, ya que el medio de transferencia de energía no será sólo el aire, sino también los materiales de la estructura. [11]

9.2 RESULTADOS DE DIFERENTES ESTUDIOS

9.2.1 Estudio 8: Ensayos realizados por el proyecto FABRIC

El presente apartado recoge las ideas principales de uno de los trabajos del proyecto FABRIC [11], que buscaba el análisis de las posibles pérdidas adicionales de energía EM causadas en el interior del pavimento tras la integración.

Este tipo de pérdida de potencia, en principio, debería incluir tanto la pérdida eléctrica por polarización dieléctrica y conducción, como la pérdida magnética. En el caso del estudio realizado por el proyecto FABRIC, se consideró que los materiales que forman el pavimento no son magnéticos, dejando las pérdidas relacionadas a este aspecto fuera del análisis.

De cara a las pérdidas dieléctricas, cuando se activa la acción de carga, los campos magnéticos variables en el tiempo en la región alrededor y entre las bobinas de un sistema IPT inducen campos eléctricos, que son responsables de las tensiones inducidas en las bobinas. Estos campos eléctricos son pequeños en

comparación con las magnitudes encontradas en los sistemas de aislamiento típicos de los aparatos de potencia, pero podrían causar cierto grado de pérdida de energía eléctrica debido a la polarización eléctrica y a una ligera conducción en los materiales del pavimento alrededor de un sistema IPT activo. Una forma común de definir la pérdida de potencia en un medio dieléctrico, causada por la presencia de un campo eléctrico sinusoidal a frecuencia f , es utilizar la siguiente ecuación: [11]

$$P_{loss} = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r'' |E|^2$$

Donde:

- P es la potencia absorbida por unidad de volumen (W/m³) como valor medio en el tiempo para la excitación periódica.
- ϵ son las permitividades, la primera de ellas es la del vacío y la segunda es el factor de pérdidas dieléctricas.
- E (V/m) es la magnitud del campo eléctrico.
- f (Hz) es la frecuencia de los campos eléctricos.

Partiendo de esta ecuación, que deja ver como la pérdida de potencia se rige por la frecuencia y amplitud de los campos eléctricos y el factor de pérdida dieléctrica, los trabajos del proyecto FABRIC buscan su aplicación y desarrollo ante sistemas IPT en pavimentos.

De cara a los materiales analizados por este estudio, se trabajó con hormigón asfáltico (AC por las siglas en inglés) y hormigón de cemento Portland (PCC por las siglas en inglés), más concretamente, se produjeron en laboratorio mezclas de AC con tres granulometrías de áridos diferentes y una mezcla común de PCC. Estas composiciones y sus correspondientes propiedades se muestran en las Fig. 57 y 58 respectivamente.

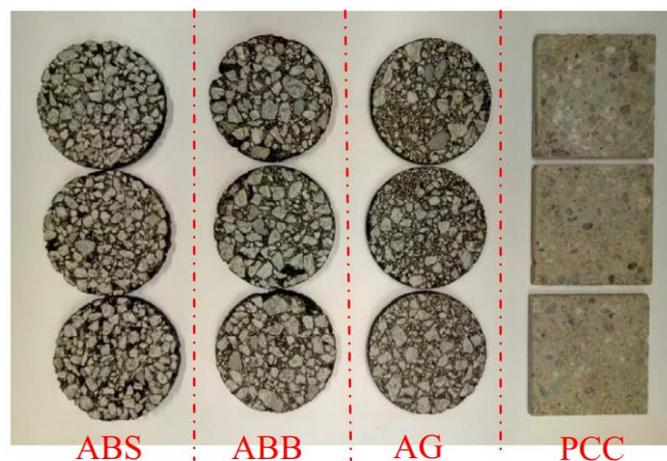


Fig. 57. Muestras de ensayo. [11]

Material type	ABS16	ABb22	Ag22
<i>Aggregate gradation</i>			
Sieve size [mm]	Percentage passing [% by weight]		
0.063	9.5	6	6
0.125	11	8	9
0.25	13	11	12
0.5	15	15	16
1	17	19	21
2	21	25	30
4	24	35	44
5.6	26	39	50
8	34	45	59
11.2	55	54	67
16	100	75	78
22.4	100	100	96
31.5	100	100	100
<i>Other properties</i>			
Bulk density [g/cm ³]	2.378	2.407	2.490
Target air voids [% by volume]	2.8	3.7	5.5
Binder content [% by weight]	6.1	5.2	4.9

Fig. 58. Propiedades de los materiales. [11]

Por su parte, las muestras de PCC se produjeron utilizando áridos con un tamaño máximo de 16 mm, con una relación agua/cemento (w/c) de 0,4-0,5, y un contenido de vacíos de aire en el rango 4,5%-6%.

Los resultados de los primeros análisis realizados por este estudio se muestran en la Fig. 59, donde se compara el factor de pérdida dieléctrica de las diferentes composiciones a diferentes frecuencias y para diferentes humedades.

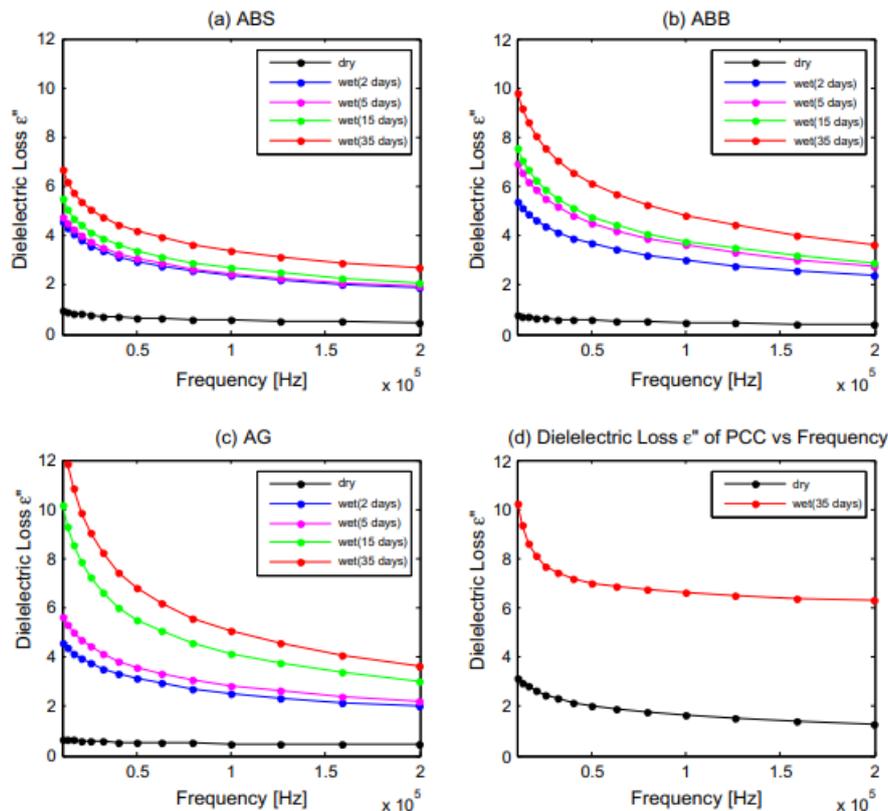


Fig. 59. Primeros resultados. [11]

Tras estos análisis, se llevó a cabo la predicción de cómo se vería afectada la transferencia de potencia en una eRoad, llevando a los resultados mostrados en la Fig. 60.

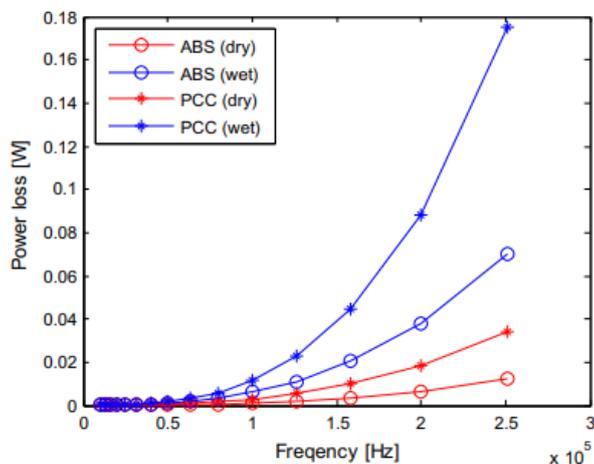


Fig. 60. Predicción de pérdida de potencia. [11]

9.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

De los resultados mostrados en la Fig. 59 se puede afirmar que la humedad es un aspecto de gran importancia, siendo en estado seco donde los diferentes materiales poseen el menor factor de pérdida dieléctrica y donde menos variabilidad generan las diferentes frecuencias. En ese aspecto las mezclas de AC en estado seco se mantienen en un valor en torno a 1 y la mezcla de PCC, por su parte, varía aproximadamente de 3 a 1 a medida que la frecuencia aumenta.

A medida que la cantidad de agua infiltrada en el material aumenta, tanto las mezclas de AC como la de PCC registran factores de pérdidas dieléctricas mayores, con el mayor aumento dándose a bajas frecuencias.

De cara a los resultados de la Fig. 60, donde se muestran las pérdidas de potencia eléctrica causadas en la estructura del pavimento, se puede ver que estas son muy pequeñas en comparación con la potencia transferida para un sistema IPT de este tipo. En otras palabras, es poco probable que esta pérdida de potencia dieléctrica provoque una disminución sustancial de la eficiencia de transferencia de energía de un sistema IPT actual bajo los supuestos llevados a cabo por este estudio. Esto se hace más evidente si se comparan las pérdidas previstas con las frecuencias de trabajo de diferentes sistemas de carga que se muestran en la figura inferior.

Frequency	Output power	Gap distance	Max. magnetic field B (roughly)	Pad size (d = diameter)
100 kHz	1 kW	<130 mm	0.1 mT	100 mm
20 kHz	1.5 kW	<70 mm	0.1 mT	250 mm
10-40 kHz	2 kW	<40 mm	0.3 mT	420 mm
20 kHz	5 kW	<200 mm	0.12 mT	780 mm
20 kHz	7 kW	<125 mm	Up to 2 mT	700 mm
~20 kHz	25 kW	<200 mm	Up to 1.8 mT	Not available

Fig. 61. Características de diferentes sistemas de carga IPT. [11]

De esta comparación se observa como la frecuencia máxima de trabajo registrada es de 100 kHz y como el valor más común ronda los 20 kHz. Si con estos valores se va al gráfico de la Fig. 33, se aprecia como las pérdidas para estas frecuencias estarían entre 0 y 0,02 W, lo que supone un valor casi despreciable. No obstante, si el despliegue a gran escala de soluciones de carga dinámica se convierte en una realidad en el futuro, sigue teniendo sentido intentar minimizar esta pérdida de energía.

Buscando esa optimización y tras los resultados mostrados por el Estudio 6, se pueden destacar los siguientes puntos:

- La pérdida de energía depende en gran medida de la frecuencia de trabajo del sistema y de la amplitud de la densidad de flujo magnético, cuyo aumento incrementará significativamente la pérdida de energía de este tipo.
- La humedad parece ser un factor de influencia significativo que puede aumentar la pérdida dieléctrica, lo que significa que la consideración de la impermeabilidad para un diseño de eRoad puede ser útil en algún momento.
- Los materiales de AC inducen menos pérdida de energía que los de PCC, tanto en condiciones secas como húmedas.

Aún quedan algunos puntos que podrían ser de interés para futuros estudios o proyectos, como lo puede ser el análisis de las propiedades dieléctricas de otros tipos de materiales de pavimentación, como las mezclas de asfalto poroso que poseen un mayor potencial de entrada de humedad, así como mezclas de asfalto con agregados alternativos (por ejemplo, escoria de acero) que tienen comportamientos de permitividad desconocidos.

También cabe destacar que las propiedades dieléctricas de los materiales de pavimentación pueden verse afectadas por la degradación a largo plazo de los materiales y las estructuras (por ejemplo, el envejecimiento y el agrietamiento), así como por las condiciones climáticas, como la nieve, el hielo y los materiales de deshielo en invierno, que merecen una mayor atención.

Por último, otro punto de interés podría ser el análisis de materiales con propiedades magnéticas que podrían tener una pérdida por polarización magnética directa, además de la pérdida eléctrica (dieléctrica o de conducción) ya explicada anteriormente.

10 METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología seguida a lo largo del trabajo se ha basado principalmente en la recopilación y análisis de información de diferentes estudios relacionados a los vehículos eléctricos y las carreteras diseñadas para su recarga.

En la primera etapa del proyecto y buscando fijar los aspectos que iba a cubrir este Trabajo Final de Máster, se comenzó por una visión más general, donde se establecieron las ideas generales y una vez analizado el estado del arte, se comenzó a buscar los aspectos más concretos.

Tras esto, se eligieron diferentes estudios que aportaban resultados de ensayos realizados a diferentes aspectos de las eRoad, pudiendo así comparar datos de distintas fuentes y llegar a conclusiones más completas. Esto en algunos momentos fue la etapa más complicada debido a que este tipo de estructuras no están muy desarrolladas todavía y los proyectos relacionados a ellas son escasos.

De cara a los tiempos de las diferentes etapas del proyecto, la recopilación de información y la redacción de este documento han ido prácticamente de la mano y han seguido el orden mostrado a lo largo del mismo.

11 CONCLUSIONES

De forma general se puede concluir que este Trabajo Final de Máster ha cumplido su principal objetivo, siendo este realizar el estudio de pavimentos para recarga de vehículos eléctricos. Se han recogido datos aportados por diferentes estudios que han llevado a definir las principales características y aspectos de mayor importancia a la hora del diseño de este tipo de carreteras.

En ese sentido, es evidente la gran importancia que el comportamiento térmico y mecánico llegan a tener, dependiendo en muchos casos el uno del otro. La temperatura, la cual varía en gran medida por las acciones del entorno y el calor generado por la unidad de carga, no solo se refleja en el rendimiento del sistema o su refrigeración, si no que influye de manera directa en las posibles deformaciones y desplazamientos de la estructura. Del mismo modo, las cargas del tráfico afectan de manera directa a estos últimos aspectos, siendo grandes causantes de la aparición de tensiones y deformaciones a lo largo de la carretera, que podrían llevar a daños en ella.

Otro aspecto que merece la pena destacar es la propia integración del sistema de carga. Esta acción supone una variación de las propiedades de la carretera y es causante de la aparición de zonas críticas, ya sea por las diferencias en las propiedades de los materiales o por las geometrías de diseño. Es por ello, que, ante el diseño de los sistemas de carga, sus carcasas y sellado, conviene priorizar el uso de materiales que tengan propiedades térmicas y mecánicas similares a las que dispone la carretera donde se lleva a cabo la integración, reduciendo así posibles roturas, grietas o deterioros.

Por ello, materiales como el hormigón, que garantizan una gran resistencia hacia las cargas del tráfico y soportan las altas temperaturas del sistema, parecen una opción acertada, no solo para la propia estructura de la carretera si no para desarrollar sistemas de carga con carcasas adecuadas. Además, la posibilidad de variar su composición abre un abanico de posibilidades, como lo puede ser añadir áridos de alta conductividad térmica que ayuden a disipar con mayor facilidad el calor. De cara a las zonas críticas, la posibilidad de usar resinas de sellado de resistencia y comportamiento térmico similar al hormigón reduciría la aparición de daños. Al fin y al cabo, la idea debe ser conseguir, siempre que sea posible, un comportamiento homogéneo de la estructura.

Tras lo visto a lo largo del documento, la evolución de este tipo de carreteras es constante y se aprecia un gran desarrollo no solo buscando comprender mejor este tipo de estructuras si no también hacia los diferentes métodos utilizados para su análisis. Es así que las eRoad prometen ser un método de carga con mucho futuro por delante y capaces de impulsar el uso de los vehículos eléctricos.

12 FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

A medida que se avanza en el desarrollo de carreteras para recarga de vehículos eléctricos, es crucial identificar áreas de mejora y definir futuras líneas de trabajo que permitan abordar los desafíos y optimizar estas infraestructuras.

De forma general, futuros proyectos deberían abordar la importancia de un análisis exhaustivo de la carretera en la que se llevará a cabo la integración, siendo conscientes de su composición y la zona climática. Esto se debe a que, en la mayoría de los casos, los equipos se instalan en carreteras convencionales ya construidas, por lo que se debe buscar que el sistema de carga se adecue a ellas y no al revés.

De cara a los materiales, una futura línea de trabajo podría ser la investigación de materiales sostenibles, lo que implica examinar fuentes de materiales alternativos, como aglomerantes de materiales reciclados o mezclas asfálticas con menor contenido de carbono. Esto podría incluir el estudio de aglutinantes orgánicos, como el asfalto de caucho reciclado, o la incorporación de residuos de construcción y demolición en la mezcla. Además, se podrían analizar las implicaciones ambientales de estos materiales a lo largo de su ciclo de vida, considerando la extracción, la fabricación, el uso y la disposición final.

En ese sentido, a lo largo del documento se han visto diferentes estudios y gran variedad de materiales, pero en cada caso se aplicaba una estructura diferente con capas y espesores que variaban de una a otra, dificultando en muchos casos la comparación de resultados y la búsqueda de conclusiones. Por ello, un punto interesante sería realizar ensayos sobre una misma estructura y variando los materiales que se han ido viendo a lo largo del documento y los que pudieran surgir de aquí en adelante.

De este modo, se podría sacar una conclusión más acertada y precisa de cómo estos materiales se comportan en las eRoad, pudiendo así identificar cuáles son los más apropiados.

13 BIBLIOGRAFÍA

[1] Mastoi, M. S., Zhuang, S., Munir, H. M., Haris, M., Hassan, M., Usman, M., et al. (2022). An in-depth analysis of electric vehicle charging station infrastructure, policy implications, and future trends. *Energy Reports*, 8, 11504-11529.

doi:10.1016/j.egy.2022.09.011

[2] Mazhoud, B., Gabet, T., Kadem, K., Meira, Z., Sanzel, A., Coquelle, E., et al. (2022). Pavement integration of an inductive charging system for electric vehicles. results of the INCIT-EV project. *Transportation Engineering*, 10, 100147.

doi:10.1016/j.treng.2022.100147

[3] Talita de Freitas Alves. Thermomechanical behaviour of bituminous layers containing rigid inserts for eRoads. Civil Engineering. École centrale de Nantes; Universidade de São Paulo (Brésil), 2022. English. ffNNT : 2022ECDN0038ff. fftel-03920982f

[4] Chen, F., Taylor, N., & Kringos, N. (2015). Electrification of roads: Opportunities and challenges. *Applied Energy*, 150, 109-119.

doi:10.1016/j.apenergy.2015.03.067

[5] Connolly, D. (2017). Economic viability of electric roads compared to oil and batteries for all forms of road transport. *Energy Strategy Reviews*, 18, 235-249.

doi:10.1016/j.esr.2017.09.005

[6] Gabet, T., Mazhoud, B., Kadem, K., Meira, Z., Sanzel, A., Coquelle, E., et al. (2023). Thermo-viscoelastic analysis of an inductive charging system included in an eRoads. incit-ev project. *Transportation Engineering*, 11, 100161.

doi:10.1016/j.treng.2023.100161

[7] Aghcheghloo, P. D., Larkin, T., Wilson, D., Holleran, G., Amirpour, M., Kim, S., et al. (2023). The effect of an emulator inductive power transfer pad on the temperature of an asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 392, 131783.

doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.131783

[8] Jizhe Zhang. Enhancement of rutting resistance and fatigue behavior of asphalt mixtures modified by recycled waste polymer components.

[9] Chabot, A., & Deep, P. (2019). 2D multilayer solution for an electrified road with a built-in charging box. *Road Materials and Pavement Design*, 20(sup2), S590-S603.

doi:10.1080/14680629.2019.1621445

[10] Nodari, C., Crispino, M., & Toraldo, E. (2022). Fatigue effects of embedding electric vehicles charging units into electrified road. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00848.

doi:10.1016/j.cscm.2021.e00848

[11] Chen, F., Taylor, N., Balieu, R., & Kringos, N. (2017). Dynamic application of the inductive power transfer (IPT) systems in an electrified road: Dielectric power loss due to pavement materials. *Construction and Building Materials*, 147, 9-16.

doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.04.149