

c@rreteras

4ª ÉPOCA · Nº 235 · AÑO 2021 REVISTA TÉCNICA DE LA ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE LA CARRETERA



premio internacional
A LA INNOVACIÓN EN CARRETERAS
JUAN ANTONIO FERNÁNDEZ DEL CAMPO

Octava Edición

2019 - 2020

En páginas interiores

V CONGRESO ANDALUZ DE CARRETERAS

Hacia la próxima
generación de
c@rreteras

GRANADA, DEL 6 AL 8 DE ABRIL DE 2022





Nada se pierde todo se recicla.

Para construir o reparar calzadas Probisa elabora soluciones alternativas como el reciclaje de la carretera "in situ", la reutilización de residuos industriales y domésticos, o de los materiales de demolición. Las viejas carreteras ya no se pierden, y de este modo, ahorramos recursos naturales. Nuevas ideas hechas realidad.

Probisa
Abrimos paso a nuevas ideas



nº 235 / año 2021

EMPRESAS COLABORADORAS

EIFFAGE

PROBISA

Especial VIII Edición del “Premio Internacional a la Innovación en Carreteras Juan Antonio Fernández del Campo”

Coordinadores: Félix Edmundo Pérez Jiménez, Presidente del Jurado, y Marta Rodrigo Pérez, Secretaria de la Comisión de Valoración del certamen

4 editorial

Una nueva década para la seguridad vial

6 presentación

La buena salud de la investigación en el sector viario
Félix Edmundo Pérez Jiménez

artículos

8 Sistema integral para el mantenimiento eficiente de pavimentos urbanos

Eugenio Pellicer Armiñana / Roberto Paredes Palacios /
Jesús Felipe Sanjuán / Juan Sánchez-Robles Bello

19 Estudio de riegos bituminosos de adherencia para rehabilitación de firmes flexibles fresados

José Julián Rivera

30 Nuevo método de prueba para determinar el potencial de fractura del ligante asfáltico

Álvaro Gutiérrez Muñoz / Raymundo Benítez López

42 Un nuevo modelo de peaje urbano. Aplicación a Barcelona

Juan Pedro Hormigo Ventura / Mateu Turró Calvet

55 Optimización de la gestión ambiental de vehículos en carreteras

Marta García García / Juan Francisco Coloma Miró /
Gonzalo Fernández Fernández / Alessandra Boggio-Marzet Riccio

68 Desarrollo y aplicación de tecnologías de avanzada para el estudio del comportamiento y mejora de métodos de diseño de pavimentos rígidos

Eduardo Tejeda Piusseaut / Edwin Alexander Rodríguez Vélez /
Félix Michael Hernández López / Carlos A. Recarey Morfa /
Marcio Muniz de Farias / Miguel Ángel Celigueta Jordana

83 Especial “Páginas Verdes”. V Congreso Andaluz de Carreteras



114 área de servicio

ver en nuestra web: www.aecarretera.com

118 guía profesional de empresas colaboradoras

CONSEJO DE REDACCIÓN

Vocales

José Manuel Alameda Villamayor
M^a Yolanda Alcaraz Nuño
Fernando Argüello Álvarez
Eduardo Ayuso Barrios
Rosálía Bravo Antón
Francisco García Sánchez
Mariló Jiménez Mateos
Jesús Leal Bermejo
Enrique Miralles Olivar
Elena de la Peña González
Vicente Pérez Mena
Juan José Potti Cuervo
Sebastián de la Rica Castedo
Miguel Ángel Salvia
Ángel Sampedro Rodríguez
Ana Serrano de la Fuente
Pedro Tomás Martínez
Francisco José Veá Folch
Iñaki Zabala Zuazo
Ángel Zarabozo Galán

PRESIDENTE

José Vicente Martínez Sierra

DIRECTOR

Jacobo Díaz Pineda

DIRECTORA EJECUTIVA

Marta Rodrigo Pérez

REDACTORA JEFE

Susana Rubio Gutiérrez

DISEÑO Y MAQUETACIÓN

José María Gil

EDICIÓN Y PUBLICIDAD

COMUNICACIÓN Y DISEÑO

O'Donnell, 18 - 5º H
28009 Madrid
Tel.: +34 91 432 43 18
comdis@cydiseno.com
www.cydiseno.com

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE LA CARRETERA

Goya, 23 - 4º Derecha
28001 MADRID
Tel.: +34 91 577 99 72
aec@aecarretera.com
www.aecarretera.com

SUSCRIPCIÓN ANUAL

(Año 2021)

España:
66 Euros (IVA incluido)
Europa:
109 Euros
América:
160 \$ / 155 Euros
Depósito Legal:
M- 19.439-1975
ISSN: 0212 - 6389

Las opiniones vertidas en las páginas de *Carreteras* no coinciden necesariamente con las de la Asociación Española de la Carretera o las del Consejo de Redacción de la publicación.



Sumando multiplicamos

En un momento en el que la movilidad autónoma y conectada se está desarrollando a una gran velocidad a través de iniciativas que ya son una realidad en distintos lugares del mundo, es interesante hacer, una vez más, desde estas páginas, una reflexión sobre la importancia de la infraestructura en el contexto de este nuevo modelo de movilidad.

¿Los vehículos autónomos serán capaces por sí mismos de garantizar una movilidad con estándares adecuados de seguridad, fluidez, eficiencia, etc.? Probablemente sí, pero no en un futuro próximo y, desde luego, no en todas nuestras vías.

En el 2º Congreso Español de Smart Roads, celebrado en Madrid en diciembre de 2021 organizado por la Asociación Española de la Carretera, se puso de manifiesto el papel de la infraestructura como elemento optimizador de la movilidad autónoma, con un interesante concepto apuntado desde el Centro Tecnológico de Automoción de Galicia (CTAG): “La ampliación del horizonte de percepción del vehículo autónomo con la inteligencia de la infraestructura”.

El vehículo inteligente, con multitud de sensores embarcados, puede mejorar sus posibilidades de percepción gracias al despliegue de tecnología en la infraestructura. Así, equipamiento viario de última

generación puede contrarrestar, o al menos amortiguar, las limitaciones que aquellos sensores presentan y que pueden afectar a situaciones diversas, tales como la identificación de usuarios vulnerables en ángulos muertos del vehículo por medio de cámaras instaladas en una intersección, o proporcionando información en tiempo real al usuario bajo condiciones climáticas adversas.

El desigual desarrollo de la tecnología para la movilidad autónoma en el vehículo y la infraestructura ha otorgado una enorme visibilidad a la tecnología embarcada, la cual, hoy en día, proporciona soluciones comerciales de conectividad que están disponibles en una amplia gama de vehículos. En este escenario, pareciera que la infraestructura sigue anclada en el pasado, y nada más lejos de la realidad. La tecnología desplegada en nuestras redes de carreteras proporciona actualmente una enorme cantidad de datos y facilita servicios que mejoran la eficiencia del tráfico y la seguridad. Y los proyectos que están en marcha en este momento apuntan hacia una movilidad cooperativa, conectada y automatizada, en cuya materialización la tecnología desplegada en la carretera tiene mucho que aportar.

No se trata de sustituir ni de cambiar, se trata de sumar; sumar para que la movilidad sea lo más segura y eficiente posible. Sumar la inteligencia de la infraestructura a la inteligencia del vehículo para multiplicar la eficacia en el despliegue real de la automatización. ■



LA CARRETERA DEL FUTURO

Félix Edmundo PÉREZ JIMÉNEZ
Presidente del Jurado de la VIII Edición del
"Premio Internacional a la innovación en Carreteras
Juan Antonio Fernández del Campo"



La buena salud de la investigación en el sector viario

Un año más he tenido el honor de formar parte del jurado del "Premio Internacional a la Innovación en Carreteras Juan Antonio Fernández del Campo" como Presidente en su VIII Edición. Premio que se ha convertido en un referente entre los técnicos y especialistas del mundo ibero-latinoamericano, al que va especialmente dirigido su objetivo de promoción y difusión de la innovación en carreteras.

En España, cómo también en muchos países europeos y americanos, para la mayoría de sus habitantes, las calles, las carreteras son un bien y un servicio de calidad al que nos hemos ido acostumbrando, sobre todo los más jóvenes, pensando que siempre ha estado ahí. Pues no. Nos ha costado un gran esfuerzo conseguirlo y podemos perderlo si no ponemos atención e interés en seguir construyendo y mejorando nuestro patrimonio vial.

En estos tiempos de incertidumbre, el haber formado parte del jurado del Premio Juan Antonio Fernández del Campo me ha proporcionado la alegría y esperanza de comprobar que, al menos en este sector, sus técnicos y profesionales continúan profundizando en el conocimiento científico de los materiales para carreteras, en los métodos de diseño de pavimentos y también en la incorporación de las nuevas tecnologías (Big-Data, inteligencia artificial, sistemas de referencia, etc.).

Y, en esta ocasión, me congratula compartir con los lectores de la Revista *Carreteras* una selección de los trabajos que, ahondando en estas cuestiones, se han presentado a la octava edición del

certamen, poniendo de manifiesto la magnífica salud de que goza la investigación y la innovación en el ámbito del sector viario.

Un compendio de todas esas facetas que he citado y que constituyen la base de la innovación y de la investigación en este sector es el trabajo que ha recibido el Premio Juan Antonio Fernández del Campo.

"Sistema integral para el mantenimiento eficiente de pavimentos urbanos", presentado por Eugenio Pellicer Armiñana y Roberto Paredes Palacios, de la Universitat Politècnica de Valencia; Jesús Felipe Sanjuán, de PAVASAL Empresa Constructora, S.A., y Juan Sánchez-Robles Bello, de CPS Infraestructuras, Movilidad y Medio Ambiente, S.L.

Como pueden comprobar nuestros lectores, el trabajo incorpora las nuevas tecnologías para la automatización de las tareas de auscultación a través de imágenes con cámaras convencionales y procesamiento posterior de las mismas mediante técnicas de aprendizaje profundo e inteligencia artificial. Además, profundiza en el análisis de datos para obtener los modelos de comportamiento de los pavimentos, incluyendo no solo el estado y tipo de pavimento, sino también variables relacionadas con el volumen de tráfico y las condiciones climatológicas. La investigación implementa un sistema de toma de decisiones considerando criterios ambientales y económicos, y el software diseñado es capaz de predecir el estado futuro de la red vial de acuerdo con las actuaciones planificadas.

Por su parte, el trabajo al que le ha sido concedido el Accésit del Premio profundiza en el comportamiento de las interfases de las capas de mezcla bituminosa en la rehabilitación de un pavimento flexible fresado. Establece que las dotaciones de riego de liga, riego de adherencia, pueden ser estimadas en función del incremento de la superficie de la interfase debido a la aparición del fresado. Esta metodología se verifica a través de ensayos realizados en laboratorio y tramos experimentales.

El autor de este trabajo, de título "Estudio de riegos bituminosos de adherencia de firmes flexibles fresados", es el doctor ingeniero José Julián Rivera, profesor de la Universidad de La Plata (Argentina).

Hay otros cuatro trabajos que el Jurado también ha querido destacar, algunos de los cuales se recogen en esta edición especial de la Revista *Carreteras*. Todos ellos son una muestra, junto con los estudios premiados, de las actuaciones de innovación y desarrollo que se están llevando en el campo de la tecnología carreteras.

Dos de ellos presentan nuevos métodos y tecnologías para el estudio de materiales y diseño de pavimentos: "Nuevo método de prueba para determinar el potencial de fractura del ligante asfáltico", cuyos autores son Alvaro Gutiérrez y Raymundo Benítez (México). Y "Desarrollo y aplicación de tecnologías de avanzada para el estudio del comportamiento y mejora de métodos de diseño de pavimentos rígidos", del que son autores técnicos y profesores de cuatro países

diferentes (Ecuador, Cuba, Brasil y España), figurando el profesor Eduardo Tejada como primer autor.

Los otros dos están relacionados con un tema de gran interés en nuestros días, la conservación del medio ambiente. Son trabajos procedentes de España: "Nuevo modelo de peaje urbano. Aplicación a Barcelona", presentado por Juan Pedro Hornigo, y "Optimización de la gestión ambiental de vehículos en carreteras", cuya autoría corresponde a un grupo de profesores de las universidades de Extremadura y Politécnica de Madrid, con Marta García como primera autora.

Junto a estos seis trabajos hay 17 más que también se han presentado al Premio. A todos sus autores deseo felicitarles y agradecerles su participación, pues son su esfuerzo y desvelos los que ayudan a hacer progresar la técnica de carreteras.

No puedo concluir esta presentación del número especial de la Revista *Carreteras* sin dedicar unas palabras de agradecimiento a todos los miembros del Jurado del Premio y a quienes participan en la Comisión de Valoración que ayuda al Jurado en su labor. Todos ellos han realizado una excelente labor, aplicando su gran experiencia, altos conocimientos y acertado criterio.

Por último, deseo poner de manifiesto la labor que la Fundación de la Asociación Española de la Carretera, a través del Premio *Juan Antonio Fernandez del Campo*, está llevando a cabo para el desarrollo del conocimiento en las técnicas de carreteras. ■



Sistema integral para el mantenimiento eficiente de pavimentos urbanos

Integrated system for the efficient maintenance of urban pavements

Eugenio PELLICER ARMIÑANA

Catedrático. Grupo de Gestión del Proceso Proyecto-Construcción. Universitat Politècnica de València

Roberto PAREDES PALACIOS

Catedrático. Centro de Investigación Pattern Recognition and Human Language Technology. Universitat Politècnica de València.

Jesús FELIPO SANJUÁN

Director Técnico. Pavasal Empresa Constructora, S.A.

Juan SÁNCHEZ-ROBLES BELLO

Técnico Director de Proyectos y Obras. CPS Infraestructuras Movilidad y Medio Ambiente, S.L.

RESUMEN

El sistema para el mantenimiento eficiente de pavimentos urbanos es un proyecto de innovación derivado de la colaboración universidad-empresa. Este sistema automatiza las tareas de auscultación de pavimentos urbanos obteniendo imágenes con cámaras convencionales y procesándolas posteriormente mediante técnicas de aprendizaje profundo. Además, incorpora la optimización y toma de decisiones predictivas que incluye, no sólo los criterios técnicos tradicionales (como estado del pavimento y climatología, por ejemplo), sino también ambientales (emisiones de CO₂) y sociales (la proximidad a infraestructuras críticas). La aplicación está basada en una interfaz visual amigable para el usuario que permite la identificación y cuantificación de deterioros en el pavimento de manera automática, la predicción del estado futuro de la red y el establecimiento de una programación eficiente y proactiva de las actuaciones de mantenimiento y rehabilitación del pavimento urbano a medio-largo plazo.

PALABRAS CLAVE: Evaluación, Inspección, Mantenimiento, Pavimento Urbano, Predicción.

ABSTRACT

The integrated system for the efficient maintenance of urban pavements is an innovation project derived from collaboration between a public university and private enterprises. This system automates the tasks of auscultation of urban pavements obtaining images with conventional cameras and later processing them, using deep learning techniques. In addition, it incorporates optimization and predictive decision making that includes, not only traditional technical criteria (such as the state of the pavement and weather conditions, for example), but also environmental (CO₂ emissions) and social criteria (proximity to critical infrastructure). The application is based on a friendly visual interface that allows identification and quantification of pavement deterioration in an automatic way, the prediction of the future state of the network, as well as the establishment of an efficient and proactive maintenance and rehabilitation program of urban pavement in the medium-long term.

KEY WORDS: Assessment, Inspection, Maintenance, Urban Pavement, Prediction.

Introducción

La gestión de pavimentos está basada en la obtención de información certera y homogénea que permita desarrollar criterios de decisión y plantear alternativas realistas de inversión. La gestión eficiente de pavimentos pretende mantener la red de carreteras en un nivel de servicio aceptable, minimizando el presupuesto de inversión, sin afectar de manera significativa al medio ambiente, a la seguridad vial y a las actividades de la sociedad^(x). Destacan tres operaciones fundamentales en la gestión de pavimentos: (1) la evaluación de la condición del pavimento; (2) la predicción de la condición del pavimento; y (3) la priorización de actuaciones de acuerdo a ciertos objetivos y restricciones. Los siguientes párrafos desarrollan la práctica actual en estas fases.

Para la evaluación de la condición del pavimento, existen dos tipos de inspección: auscultación e inspección visual. Mientras que la inspección mediante auscultaciones está basada principalmente en indicadores objetivos obtenidos a través de ciertos instrumentos de medida estándar, la inspección visual se lleva a cabo mediante la experiencia profesional de técnicos que evalúan el estado del pavimento a partir de su apariencia, lo que introduce cierta subjetividad en la evaluación del daño. A pesar de dicha subjetividad, en el entorno urbano el método más común de inspección es el visual, principalmente debido a la dificultad de obtener indicadores objetivos en un entorno caracterizado por la presencia de intersecciones, variaciones significativas de la velocidad de circulación y fluctuaciones importantes del tráfico^(xx). Para minimizar la subjetividad ligada a la inspección visual, esta debe basarse en criterios lo más sencillos posible; para ello, un apoyo fundamental son los catálogos de firmes o manuales en los que aparecen los tipos de deterioros con imágenes, descripciones y modos de cuantificación.

No obstante, el tratamiento automático de imágenes se postula como el futuro de la evaluación de la condición del pavimento, puesto que permite desarrollar modelos capaces de realizar de manera objetiva y automática la evaluación^(xvii). Estos métodos destacan por su versatilidad, ya que no son únicamente capaces de brindar buenos resultados en tareas de clasificación, sino que, suministrando la información de forma correcta, el modelo puede detectar objetos dentro de una imagen y segmentar el área que estos ocupan.

Los primeros estudios llevados a cabo sobre la detección de deterioros en el pavimento a través de imágenes se centraron fundamentalmente en la identificación, clasificación y cuantificación de grietas mediante algoritmos de procesamiento digital de imágenes^(viii, xxvii, xxx). Sin embargo, en los últimos años ha cobrado especial relevancia la detección y evaluación automatizada de deterioros a partir de métodos basados en técnicas de aprendizaje profundo o “deep learning”, más concretamente, a través del entrenamiento de redes neuronales convolucionales^(vii, xxii).

En cuanto a los distintos indicadores para evaluar el estado del pavimento, cabe destacar el Índice de Condición del Pavimento (PCI, *Pavement Condition Index*), que es una de las metodologías

más conocidas y empleadas a nivel mundial para la evaluación y calificación de pavimentos flexibles y rígidos^(v). De hecho, este índice ha sido recientemente considerado por la Asociación Española de la Carretera para el desarrollo de la guía de firmes para las carreteras locales⁽ⁱⁱⁱ⁾. Esta metodología, que no requiere de herramientas especializadas, se basa en la evaluación de un total de 19 tipos de daños, determinando su severidad y midiendo su cantidad. De esta manera, se obtiene un índice numérico que varía desde 0, para los pavimentos que se encuentran en mal estado, hasta 100, indicando los pavimentos que se encuentran en perfecto estado.

Otro aspecto importante a la hora de determinar sobre qué vía actuar es conocer el estado del pavimento a corto y largo plazo^(xiii). Para ello, es imprescindible disponer de modelos que permitan predecir cómo una determinada vía va a deteriorarse a lo largo del tiempo, permitiendo una efectiva planificación presupuestaria a largo plazo, así como la posibilidad de coordinar actividades de mantenimiento. Los distintos modelos para predecir la condición del pavimento se pueden agrupar en las siguientes categorías: (1) regresiones numéricas, (2) redes neuronales, (3) modelos bayesianos, y (4) cadenas de Markov y simulaciones de Monte Carlo^(xxi, xxv). Aunque la calibración de modelos de regresión requiere una gran cantidad de datos históricos, estos han sido los más empleados, debido a que permiten a los ingenieros de carreteras predecir de manera sencilla la condición del pavimento y entender la influencia de los parámetros o factores introducidos en el modelo^(iv, ix, xv).

Es importante resaltar que diversas investigaciones indican que las variables meteorológicas, como la temperatura y la precipitación, poseen un gran impacto en el deterioro del pavimento^(xx, xxiv). Sin embargo, la mayoría de los modelos de predicción han sido desarrollados para una cierta región o país con condiciones del tráfico similares, por lo que no incluyen variables esenciales, como pueden ser los factores climáticos^(xvi).

Una vez evaluada la condición del pavimento y su evolución a lo largo del tiempo, la última etapa del proceso de gestión del mantenimiento de pavimentos tiene como objetivo determinar en qué vías actuar. En este sentido, se han llevado a cabo distintos estudios con objetivos o estrategias diferentes^(xviii, xxviii, xxx). Entre todos ellos, Torres-Machi et al.^(xxviii) plantean como objetivos la maximización de la efectividad a largo plazo y la minimización de las emisiones de gases de efecto invernadero. Como restricciones incluyen que el presupuesto a utilizar no puede ser mayor al disponible y que la condición, que hace referencia al estado del pavimento, no puede ser menor a un umbral mínimo establecido. Bajo este esquema, se realiza una búsqueda de la óptima combinación de mantenimiento de cada vía en un período determinado de análisis. Los autores concluyen que el uso de la herramienta desarrollada permite, con un presupuesto similar, incrementar hasta un 22% la efectividad del tratamiento y disminuir un 12% las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera.

Estas investigaciones previas están basadas en estrategias óptimas de mantenimiento a largo plazo. Sin embargo, Espinoza-Valarezo et

al.⁶⁰ plantean una toma de decisiones anual que priorice las vías y seleccione en las que se debe actuar cada año en base al presupuesto disponible; para ello, los criterios a tener en cuenta son: confort de los usuarios; coste de accidentalidad; eficiencia económica de la actuación; proximidad a infraestructura social y turística; eficiencia ambiental de la actuación; y molestias generadas con la actuación. A pesar de que son diversos y de distinta naturaleza los factores o criterios que estas investigaciones proponen a la hora de priorizar las actividades de mantenimiento de pavimentos, en la práctica son muy pocas las administraciones que tratan de aplicar este tipo de análisis multiobjetivo. En este sentido, la mayoría de las administraciones actúan de forma reactiva, es decir, toman las decisiones tras la observación de una degradación evidente del pavimento, debido principalmente al escaso presupuesto destinado a estas operaciones, fruto de la crisis económica sufrida en la última década.

En resumen, la gestión actual del pavimento urbano se caracteriza por: (1) heterogeneidad de la estructura del firme; (2) diferencias jerárquicas en la red vial; (3) limitados recursos económicos; (4) inexistencia de métodos eficientes para la detección de daños, debido principalmente a la subjetividad de la inspección visual y la insuficiencia de datos históricos; (5) carencia de mantenimiento predictivo debido a la escasez y dispersión de modelos de predicción del deterioro; y (6) ausencia de factores relacionados con la sostenibilidad social y medioambiental en la toma de decisiones. Teniendo en cuenta estos antecedentes, surge el proyecto SIMEPU (“Sistema Integral de Mantenimiento Eficiente de Pavimentos Urbanos”), financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades en la convocatoria “Retos-Colaboración 2017”, cuyo objetivo principal es la propuesta de una nueva metodología para el mantenimiento de pavimentos urbanos que incorpora: (a) una evaluación automatizada del estado del pavimento a través del tratamiento de imágenes captadas con un sistema de bajo coste mediante técnicas de aprendizaje profundo; (b) una predicción del estado del pavimento basada en variables operacionales y climáticas; y (c) una optimización y toma de decisiones multiobjetivo para la elección óptima de las actividades de mantenimiento en base a criterios económicos, técnicos, sociales y medioambientales.

Metodología

El objetivo de la investigación es la implantación de un sistema integral de mantenimiento de pavimentos en entornos urbanos

que, a partir de imágenes procedentes de dispositivos colocados en vehículos, facilitará la optimización y la priorización de las actuaciones de mantenimiento de la red en base a criterios sostenibles. La metodología propuesta se define a partir de cinco etapas: (1) inspección automática de pavimentos urbanos mediante cámaras; (2) evaluación de la condición del pavimento a través de técnicas de procesamiento de imágenes basadas en redes neuronales convolucionales; (3) predicción de la condición del pavimento; (4) optimización multiobjetivo basada en criterios económicos, técnicos, sociales y medioambientales; y (5) técnicas de decisión para la priorización de actuaciones de acuerdo a las características de la red vial. Adicionalmente, se desarrolla un “software” que permite la consulta visual de la inspección, el conocimiento actual y futuro de la condición del pavimento de la red vial y la visualización del resultado de la priorización de actuaciones.

Inspección automatizada

1. Sistema de adquisición de imágenes

El proyecto SIMEPU se ha desarrollado tomando como base la identificación y cuantificación de todos aquellos deterioros que pudiesen ser detectados mediante imágenes 2D. De esta manera, se han considerado las siguientes tipologías de daños: grietas longitudinales, grietas transversales, grietas en forma de piel de cocodrilo, meteorización y desprendimiento, huecos y parcheo. A todos estos se suman, además, las categorías definidas como alcantarillado, marcas viales y pavimento sin daños.

En cuanto a los sistemas de adquisición de imágenes, se puede diferenciar entre imágenes estáticas y grabación de videos. Concretamente, en el proyecto se ha utilizado la videocámara Garmin Virb Ultra 30, que permite grabar con una resolución de 1920x1080 a 30 fps, con estabilizador de imagen, corrección de objetivo, GPS y conexión WIFI para control remoto. Esta cámara se coloca en la parte trasera del vehículo para permitir una grabación cenital del pavimento, tomando como base un sistema de ventosas y barras rígidas, con la ayuda de unos tirantes para evitar la caída del sistema.

2. Filtrado y procesamiento de datos

Una vez realizada la toma de datos, cada uno de los videos obtenidos, junto a su correspondiente archivo de geolocalización, son



Figura 1. Filtrado de imágenes.

procesados. Esta etapa tiene como objetivo la extracción de fotogramas del vídeo. Debido a que la velocidad de toma de datos es, aproximadamente, de 50 km/h y que la cámara está grabando a 30 fps, si se quiere obtener una imagen del pavimento cada metro, es suficiente obtener una imagen cada dos fotogramas.

Finalmente, se lleva a cabo el proceso de filtrado de imágenes, con el objeto de eliminar las zonas de la imagen que no contengan información relevante para la identificación y evaluación de los deterioros presentes en el pavimento. Las imágenes estudiadas tienen un ancho de un metro. Por tanto, la información no contenida en dicho ancho, así como la información relativa a los otros carriles de circulación, se descarta (Figura 1).

3. Obtención de imágenes del pavimento

Para la obtención de las imágenes del pavimento, se desarrolla un procedimiento de toma de datos y tratamiento de imágenes que está basado en los procesos anteriormente descritos. Siguiendo este procedimiento, se obtuvieron imágenes de 140 km de vía de la ciudad de Valencia. Esto supuso 90,1 GB de información en 9 vídeos de 186 minutos de duración y 167.784 imágenes para la caracterización de los daños. A partir de estas imágenes, se desarrolló una base de datos de imágenes que servirían posteriormente para el entrenamiento y calibración de la red neuronal convolucional que se lleva a cabo más adelante de la identificación y cuantificación automática de los deterioros urbanos. En resumen, se obtuvieron las siguientes imágenes: 5.697 de grietas longitudinales, 3.467 de grietas transversales, 595 de grietas en forma de piel de cocodrilo, 622 de meteorización y desprendimiento, 1.231 de huecos, 3.420 de parcheo, 1.149 de alcantarillado, 9.047 de marca vial y 18.002 sin daño.

Evaluación de la condición del pavimento

Un problema común al aplicar técnicas de aprendizaje profundo es la gran cantidad de datos que se necesita en la fase de entrenamiento para conseguir una adecuada generalización. Para hacer frente a esto, se utilizaron diferentes técnicas de aumento de datos ("data augmentation"). Estas técnicas consisten en realizar ligeras transformaciones a las imágenes de entrenamiento para crear nuevas imágenes lo suficientemente similares a las originales, manteniendo así la clase original pero

introduciendo algunas variaciones para lidiar con nuevos factores que pueden no estar significativamente representados en el conjunto de datos original.

El proyecto empleó dos métodos complementarios para la caracterización de imágenes y la cuantificación de daños:

- Una primera red neuronal convolucional (CNN1), encargada de identificar todos los tipos de daños incluidos en una imagen (grietas longitudinales, grietas transversales, grietas en forma de cocodrilo, baches y parches).
- Cuatro redes neuronales convolucionales (CNN2), encargadas de cuantificar la gravedad de cada tipo de deterioro clasificado por CNN1. Estas CNN determinan las características geométricas -área, longitud y anchura- de las grietas longitudinales, las grietas transversales, los baches y los parches. En el caso de las grietas transversales y los baches, se consideró toda la imagen como dañada porque estos tipos de daños suelen ocupar una gran superficie de la imagen (>80%).

Ambos métodos se basan en una arquitectura ResNet. La primera red de clasificación multietiqueta (CNN1) arrojó unos resultados de 0,9317 de precisión, 0,9252 de Recall y 0,9262 de F1 score, lo que supone elevados valores de bondad de ajuste. La Figura 5

muestra la curva ROC de CNN1. Por su parte, la CNN2, que se centró en la cuantificación de los daños a través de la segmentación de la imagen, arrojó una intersección global sobre la unión (IoU) de 0,6821 para las grietas longitudinales, 0,6709 para las grietas transversales, 0,8760 para los parches y 0,6870 para los baches.

La Figura 2 muestra varios ejemplos de la identificación y cuantificación de deterioros. En función de los valores obtenidos, cada uno de estos daños es calificado en distintos niveles de severidad según el Índice de Condición del Pavimento (PCI, *Pavement Condition Index*): baja, media y alta. Esta metodología no requiere de herramientas especializadas y está basada en la evaluación de un total de 19 tipos de daños, determinando su severidad y midiendo su cantidad. El cálculo de este índice se ha programado de manera que, una vez identificados y cuantificados los daños de una determinada sección de vía, que son agrupados en la red vial a partir de su geolocalización, se determina de manera automática el valor del PCI de la sección.

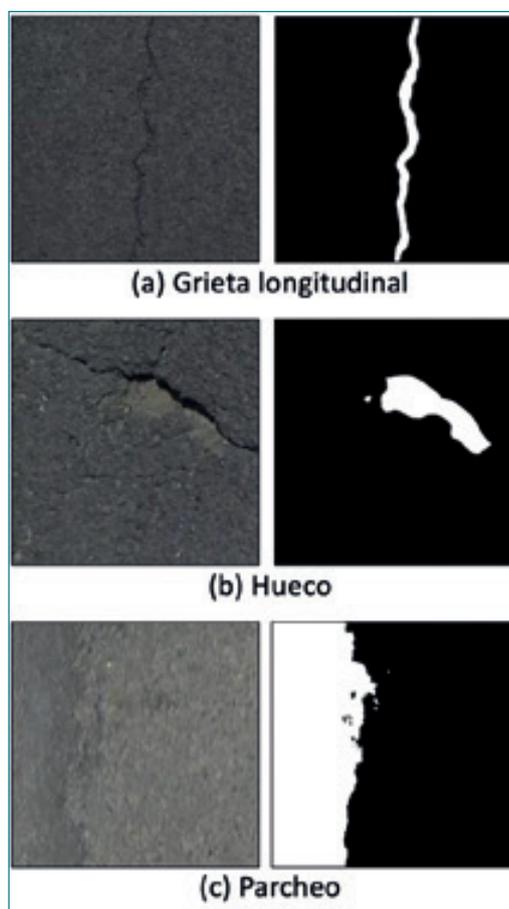


Figura 2. Cuantificación del daño.

Predicción de la condición del pavimento

La predicción de la condición del pavimento permite planificar acciones a largo plazo. Este paso es esencial para una programación eficiente del presupuesto, tanto a corto como a largo plazo, para coordinar adecuadamente las actividades de mantenimiento en la red vial; sin dicha programación y coordinación, seguramente el mantenimiento del pavimento sería más caro a largo plazo al mismo tiempo que se incurre en un peor estado de la red. En esta metodología se propone el uso de modelos de regresión lineal con el fin de conocer qué factores o variables tienen una mayor influencia en el proceso de degradación del pavimento. En este sentido, cabe destacar el tráfico, la temperatura y la precipitación como los factores que mayor impacto tienen sobre el estado del pavimento y que serán considerados en la calibración de estos modelos^(xvii).

Debido a que en España no se dispone de datos periódicos en cuanto a la evaluación del pavimento en área urbana, los primeros modelos se calibraron a partir de la base de datos americana proporcionada por el programa *Long-Term Pavement Performance* (LTPP). Esta base de datos contiene la evaluación del pavimento de multitud de secciones de vía urbana a lo largo de más de 20 años, basándose, entre otros indicadores, en los deterioros incluidos en la estimación del parámetro PCI, que es el índice propuesto en esta metodología. Una vez puesta en marcha en una determinada ciudad o región, los modelos se recalibran de manera automática, al mismo tiempo que se van tomando datos con el fin de conseguir modelos más precisos y adaptados a la zona.

Concretamente, para el desarrollo de estos primeros modelos, se consideró un total de 50 secciones de carretera urbana de Estados Unidos y Canadá, lo que supuso disponer de un total de 237 evaluaciones. Para determinar los factores más importantes en el proceso de deterioro del pavimento, se tuvieron en cuenta las siguientes variables junto a la edad del pavimento (p_a):

- Capacidad del paquete de firme:
 - ▶ Número estructural (SN): mide la resistencia y la capacidad del pavimento^(i, ii).
- Variables relacionadas con el tráfico:
 - ▶ Intensidad Media Diaria (IMD) de tráfico (veh/día).
 - ▶ Intensidad Media Diaria (IMDp) de tráfico pesado (veh/día).
 - ▶ Carga equivalente de eje único (KESAL), en miles.
- Variables relacionadas con la climatología:
 - ▶ Precipitación anual media (AAP) en mm, calculada como la precipitación de lluvia promedio anual (mm) durante la edad del pavimento (p_a).
 - ▶ Altura anual media de nieve (AAS) en mm, durante p_a .
 - ▶ Temperatura media anual (AAT) en °C, durante p_a .
 - ▶ Rango de temperatura medio anual (AART) en °C, calculado para cada año como la diferencia de temperatura entre el mes más frío y el más cálido, durante p_a .
 - ▶ Desviación estándar de temperatura (SDT) en °C, durante p_a .

- ▶ Viento medio anual (W) en km/h, durante p_a .
- ▶ Humedad media anual (H) en %, durante p_a .

Para cada segmento de carretera se identificaron las diferentes variables definidas anteriormente y se calculó el PCI en base al inventario de deterioros proporcionado. Con estos datos, y empleando la técnica de validación cruzada K-folds, se desarrollaron distintos modelos de regresión para determinar qué variables influyen significativamente en el deterioro de los pavimentos urbanos.

Optimización multiobjetivo

Una vez conocido el estado de la red vial a partir de la inspección automática y su evolución a lo largo del tiempo, la siguiente etapa trata de determinar el mejor plan de mantenimiento. Este plan tiene una visión a largo plazo, por lo que se definen las actuaciones de mantenimiento que deben llevarse a cabo durante un periodo de análisis, con el fin de conseguir una óptima asignación de los recursos durante el ciclo de vida. Para ello, se propone desarrollar una optimización multiobjetivo basada en algoritmos heurísticos que permiten obtener las secciones de la red vial que deben ser tratadas cada año. Los objetivos y restricciones que se consideran en dicha optimización están encaminados a reducir el coste económico y el impacto social y medioambiental de las actividades de mantenimiento, al mismo tiempo que se mejoran las características técnicas de la red. No obstante, serán los usuarios o administraciones de transporte quienes finalmente decidirán qué objetivos y restricciones desean considerar en su ciudad o región en base a los propuestos en esta metodología.

El proceso de optimización multiobjetivo utiliza algoritmos heurísticos para encontrar una matriz de intervención óptima que determine qué vías se deben intervenir cada año del periodo de análisis. Para la valoración económica, ambiental, social y técnica de cada intervención, se proponen cinco funciones objetivo. Además, se comprueba que se cumplen las restricciones de condición mínima de la red ($PCI > 40$) y el presupuesto disponible. Esta herramienta utiliza como datos de entrada aquellos aportados por el resto de los módulos. Los datos pueden ser dependientes de la red viaria, como la evaluación de los daños o las características geométricas y de tráfico, o independientes, como los modelos de deterioro o los datos de costes y emisiones unitarios de la base de datos.

1. Base de datos de actuaciones de mantenimiento

Para el desarrollo de una herramienta de optimización multiobjetivo, es necesario elaborar una base de datos completa que contenga toda la información necesaria para valorar las distintas actuaciones de mantenimiento en base al daño detectado y su severidad. En concreto, se estudia el coste económico, coste ambiental y tipo de corte de vía debido a la actuación de mantenimiento. Esta información se utiliza para valorar tanto los objetivos como las restricciones del problema de optimización. Para ello, se han utilizado dos fuentes de información: información directa sobre las actuaciones de mantenimiento realizadas en la ciudad de Valencia en base al daño detec-

tado, y la base de datos económica y ambiental de productos de la construcción (BEDEC) del Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña (ITeC).

Para la evaluación de la afección a los usuarios debido al corte de vía, se han valorado dos parámetros: tipo de corte de vía y horario. El tipo de corte de vía distingue si el corte de la vía se realiza en todos los carriles (total) o solo en los afectados (parcial). El horario hace referencia a si la actuación se realiza en horario diurno o nocturno.

2. Definición de criterios y funciones objetivo

Los criterios y objetivos seleccionados para la optimización multiobjetivo están encaminados a reducir el coste económico y el impacto social y medioambiental de las actividades de mantenimiento, al mismo tiempo que se mejoran las características técnicas de la red. De esta forma, se han seleccionado cinco criterios que se incluyen como función objetivo en el proceso de optimización:

1. Coste económico de las actuaciones de mantenimiento.
2. Emisiones de las actuaciones de mantenimiento.
3. Afección a los usuarios de la red viaria.
4. Nivel de importancia de las vías.
5. Mejora del estado de las actuaciones o efectividad.

Una gestión eficiente del mantenimiento implica una menor utilización de recursos económicos, por lo que el empleo del coste económico como criterio de decisión resulta imprescindible. La

medición cuantitativa de dicho criterio se materializa en euros (€). La evaluación de los costes se realiza en función del estado del pavimento en el momento en el que se lleva a cabo la actuación. Se proponen cuatro tipos de actuaciones en función del estado del pavimento: (1) reparación puntual, (2) reposición de capa de rodadura, (3) recrecio mediante capa base y rodadura y (4) demolición y restitución de las capas. El coste total se obtiene como sumatorio de los costes anuales de las actuaciones, teniendo en cuenta la tasa de descuento para obtener el Valor Actual Neto.

Una gestión de mantenimiento sostenible ha de considerar la reducción del coste ambiental. Para la medición cuantitativa de dicho criterio, se emplean los kilogramos de CO₂ asociados a las actuaciones de mantenimiento (kgCO₂). Esta función objetivo se obtiene siguiendo el mismo esquema que la función objetivo 1.

Por otra parte, la evaluación del impacto ambiental no puede entenderse sin la evaluación del impacto social de una actuación. Para llevar a cabo las actuaciones de mantenimiento urbano, es necesario realizar cortes viarios, parciales o totales, que generan una afección directa a los distintos usuarios de la red viaria, desde peatones a vehículos motorizados. Para este proyecto, la afección a usuarios vendrá condicionada por el tipo de corte de la vía (parcial o total) y el momento en el que se realiza cada intervención (nocturno o diurno). Además, se tendrá en cuenta la IMD de la vía para evaluar la magnitud del impacto sobre los usuarios. Este criterio es evaluado mediante funciones de utilidad a partir de las variables mencionadas, adoptando un valor numérico entre 0 y 1, siendo 1 el valor óptimo y 0 el valor pésimo.

Adicionalmente, dentro de una red urbana existen vías cuyo estado es prioritario para el decisor. Este criterio evalúa la importancia de la vía, bien sea por discurrir cerca de puntos de interés econó-

Reducir el coste económico y el impacto social y medioambiental, al mismo tiempo que se mejoran las características técnicas de la red viaria, son la base de la optimización multiobjetivo en un plan de mantenimiento.

mico o social o por ser una vía preferente dadas sus características. Este criterio es también evaluado mediante funciones de utilidad, adoptando un valor numérico entre 0 -valor pésimo- y 1 -valor óptimo-.

En cuanto a la efectividad, mide la mejora del estado de la vía gracias a las actuaciones de mantenimiento. Por ello, se evalúa el estado de la red a lo largo de los años mediante los modelos de predicción empleados, definiéndose así una función cuya variable dependiente es el PCI y la variable independiente el tiempo. La medición cuantitativa de este criterio será la diferencia entre el valor de la integral definida dentro del periodo de evaluación de dicha función (PCI-t, con t medido en años) después de llevar a cabo una actuación de mantenimiento y el PCI mínimo impuesto en las restricciones (Ecuación 1).

$$b_i = \int_{t=0}^{t=m} (F(PCI_t) - PCI_{\min}) \quad (1)$$

donde $F(PCI_t)$ es la función definida por los valores del PCI a lo largo del periodo a evaluar considerando la mejora por las actuaciones de mantenimiento; PCI_{\min} es el valor mínimo del PCI permitido como restricción del problema; y m es el número de años a evaluar en el problema.

3. Técnicas de decisión

En último lugar, las técnicas de decisión facilitan la asignación de los pesos a cada uno de los objetivos o criterios definidos anteriormente y permiten la normalización de los mismos con el fin de priorizar las diferentes alternativas cuando se consideran varios de estos objetivos al mismo tiempo. Estas técnicas pueden ser integradas dentro de la propia optimización multiobjetivo para guiar la búsqueda de la mejor solución o, alternativamente, pueden aplicarse después de obtener una frontera de Pareto para seleccionar una única alternativa. Para reducir los tiempos de computación, esta metodología propone desarrollar la primera de las opciones.

La metodología propuesta incorpora el método de utilidad denominado *Multi-Attribute Utility Theory (MAUT)*^(XIII). Este método emplea una función de utilidad para convertir cada valor objetivo a un valor de utilidad entre 0 y 1, lo que proporciona mayor flexibilidad a la hora de realizar la priorización de alternativas. En este sentido, cada objetivo o criterio puede tener su propia curva de utilidad con el fin de priorizar cierto rango de valores de cada uno de ellos. Las funciones objetivo 1, 2 y 5 proporcionan un valor cuantitativo que será normalizado utilizando funciones de valor lineales, siendo 1 el valor óptimo y 0 el valor pésimo (véase la Ecuación 2).

$$FV_i = \frac{1}{1 - e^{-\gamma}} \left(1 - e^{-\gamma \frac{(V_{opt} - V_i)}{(V_{opt} - V_{pes})}} \right) \quad (2)$$

		Tipo de afección	Escala de afección		
PCI	Escala	Tipo de intervención	Si AWR<50%		Si AWR>50%
85-100	Buena	Parcial/Nocturno	P/N	Baja	Alta
70-85	Satisfactoria	Parcial/Nocturno			
55-70	Justa	Total/Nocturno	T/N o P/D	Media	
40-55	Pobre	Parcial/Diurno			
25-40	Muy pobre	Total/Diurno	T/D	Alta	
10-25	Seria	Total/Diurno			
0-10	Falla	Total/Diurno			

Tabla 1. Criterio de selección de las funciones de utilidad para la función objetivo 3.

donde V_{opt} es el valor óptimo de la función objetivo; V_{pes} es el valor pésimo de la función objetivo; V_i es el valor de la función objetivo; y γ es el factor que determina la forma de la curva de valor. En el caso de las funciones objetivo 1, 2 y 5, es igual a 0.

En cambio, las funciones objetivo 3 y 4 son evaluadas a partir de valoraciones cualitativas que serán transformadas en valores cuantitativos y normalizados utilizando las funciones de utilidad. La función objetivo 3 depende de la afección a los usuarios y la IMD de la vía. Para poder valorar el grado de afección en función del estado de las vías en cualquier año del periodo de análisis, se ha analizado el tipo de daño y severidad, que cuenta con un peso mayor en cada escalón de PCI, y se han cruzado estos resultados con los mostrados en la Tabla 1. Como resultado, se han obtenido tres funciones de utilidad (baja, media y alta) en función del rango de PCI (Tabla 1) y la magnitud del daño de meteorización y desprendimiento.

Cada una de las funciones de utilidad (baja, media y alta) tomará como variable de entrada el percentil de IMD de dicha vía respecto al de la red viaria. Por tanto, las vías que tengan una IMD mayor, tendrán mayor afección a los usuarios por cortes de la vía y, en consecuencia, una utilidad menor. Del mismo modo, las vías con afecciones "bajas", es decir, tratamientos que supongan cortes parciales y nocturnos, tendrán una utilidad mayor que las vías con afecciones "medias" o "altas", para el mismo valor de la IMD. La función de utilidad viene dada por la Ecuación 3.

$$FV_3 = \frac{1}{1 - e^{-\gamma}} \left(1 - e^{-\gamma \frac{(100 - PIMDi)}{100}} \right) \quad (3)$$

donde $PIMDi$ es el percentil de la distribución de IMD del conjunto de la red asociado al valor de la IMD de la sección; y γ es el factor que determina la forma de la curva, siendo $\gamma_{baja}=0,5$, $\gamma_{media}=-1,7$ y $\gamma_{alta}=-4,75$.

Para la obtención de la función objetivo 4, se evalúa la importancia por zona y el tipo de vía. En este sentido, se considera que una sección de vía está en zona prioritaria cuando parte de su longitud

Zona prioritaria	Vía prioritaria	Función de utilidad
SÍ	SÍ	Función 1
NO	SÍ	Función 2
SÍ	NO	Función 3
NO	NO	Función 4

Tabla 2. Criterio de selección de las funciones de utilidad para la función objetivo 4.

queda dentro de un radio definido por el usuario a partir de un punto de interés. En cuanto al tipo de vía, se considera que la vía es prioritaria cuando es una vía arterial o el usuario la ha considerado como tal. A partir de estas clasificaciones, se obtienen cuatro funciones de utilidad (Tabla 2).

En este caso, la utilidad depende del PCI mínimo de una sección a lo largo del periodo de evaluación y la función de utilidad seleccionada (Figura 3). El PCI mínimo se obtiene como el menor valor de PCI que alcanza la sección de vía durante el periodo de análisis considerado. De esta forma, las vías con importancia alta obtienen un valor de utilidad menor que las vías con importancia menor, para un mismo valor de PCI mínimo. Por tanto, al optimizar esta función objetivo, las vías con importancia alta no podrán tener un valor de PCI mínimo bajo (véase la Ecuación 4).

$$FV_4 = \frac{1}{1 - e^{-\gamma}} \left(1 - e^{-\gamma \frac{PCI_{\min}}{100}} \right) \quad (4)$$

donde PCI_{\min} es el valor mínimo del PCI a lo largo del periodo de evaluación para cada sección i ; y γ es el factor que determina la forma de la curva, siendo $\gamma_1 = -4.55$, $\gamma_2 = -1.8$, $\gamma_3 = -0.40$, $\gamma_4 = 0.83$.

La función objetivo total se obtiene como sumatorio de los valores obtenidos de las funciones de utilidad multiplicados por los pesos de cada función objetivo (Ecuación 5). Los usuarios o administraciones de transporte podrán decidir qué objetivos desean considerar y los pesos de estos.

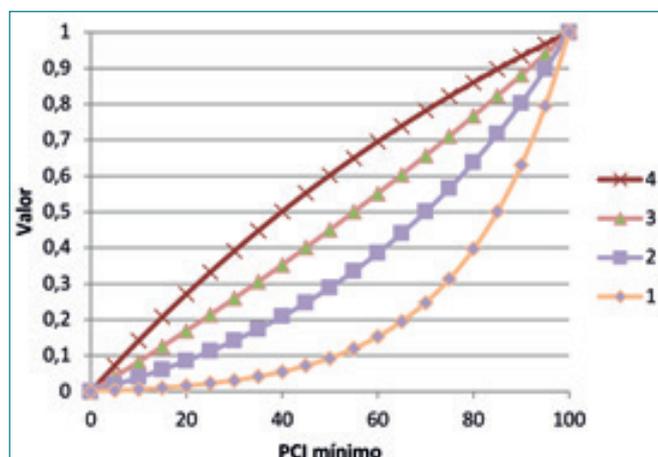


Figura 3. Funciones de utilidad de la función objetivo 4.

$$FO_T = w_1 \cdot FV_1 + w_2 \cdot FV_2 + w_3 \cdot FV_3 + w_4 \cdot FV_4 + w_5 \cdot FV_{54} \quad (5)$$

Cabe destacar que todas las etapas presentadas anteriormente están programadas en un único “software” donde, finalmente, será el usuario quien decida o seleccione sus prioridades antes de llevar a cabo la optimización. Así, en base a los criterios que la administración decida aplicar, el “software” le ofrecerá, a través de un visor GIS, el plan de mantenimiento para los próximos años.

Desarrollo del “software”

La etapa final del proyecto se centra en el desarrollo de un “software” para la gestión y planificación del mantenimiento del pavimento en entornos urbanos, que incorpora todos y cada uno de los modelos que han sido desarrollados en las etapas anteriores con el fin de facilitar lo máximo posible la aplicación de estas herramientas al usuario, administración o ingeniero encargado del mantenimiento de una red vial urbana. Las principales funciones del “software” son:

- Representación de la red vial urbana a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG).
- Detección automática de daños.
- Evaluación automática del estado de la condición del pavimento.
- Predicción del deterioro.
- Optimización de la planificación de las actuaciones de mantenimiento.

La representación de la red vial urbana a través de un Sistema de Información Geográfica tiene como objetivo recopilar, gestionar y analizar el estado de cada una de las vías. Cada segmento de la red se caracteriza con los siguientes parámetros:

- Características de la vía: Nombre, área, tipo de vía, IMD, nº de carriles, etc.
- Localización: Distrito, barrio, geometría, nivel de importancia, etc.
- Histórico de intervenciones: fecha y tipo de intervención, coste, emisiones, etc.

El proceso de detección de daños existentes en las vías es automático. A través de un video registrado por el sistema de adquisición de imágenes, el “software”, de manera automática, extrae las imágenes de cada segmento de la red, identifica los daños existentes, así como el área y nivel de severidad de dichos daños, y asocia a cada segmento la siguiente información: posición georreferenciada de cada daño, tipo de daño, severidad, área afectada, etc. Seguidamente, el “software” es capaz de estimar automáticamente la condición del pavimento de un segmento de la red. A partir de los daños detectados, el área afectada y el nivel de severidad de los



Figura 4. Identificación de daños y estimación de la condición.

mismos, determina el valor del indicador de la condición del pavimento (PCI) de cada segmento. Como se ha comentado anteriormente, toda esta información, una vez procesada, es incorporada como atributos a cada uno de los segmentos de la red (Figura 4).

A partir de la evaluación del estado actual del deterioro de las vías, el “software” es capaz de predecir la evolución de dicho deterioro a lo largo del tiempo con el objeto de identificar las vías de mayor riesgo y con mayor capacidad de afección negativa sobre los usuarios. Para ello, el programa incorpora el modelo de predicción definido por Llopis-Castelló et al.^(xv). Una de las grandes ventajas del modelo seleccionado es que permite su aplicación, generalmente, en cualquier entorno urbano, debido a que es capaz de adaptarse a las condiciones climáticas de cada área o región específica.

La Figura 5 muestra la predicción de la condición del pavimento en el distrito de En Corts de la ciudad de Valencia. Particularmente,



Figura 5. Predicción de la condición del pavimento: distrito de En Corts (Valencia).

en este ejemplo el “software” ofrece la opción de visualizar el estado del pavimento para los próximos cinco años, siendo este periodo de tiempo introducido por el usuario en base al análisis que se desee realizar. Asimismo, pueden ser visualizados cuáles serían los segmentos en los que intervenir cada uno de los años estudiados.

Finalmente, en base al estado actual y el deterioro futuro de la red, el “software” es capaz de gestionar y planificar el mantenimiento de la red mediante la optimización y priorización de actuaciones de mantenimiento que garanticen, bajo determinadas restricciones presupuestarias establecidas

por el cliente, la reducción de los costes de mantenimiento, las molestias a usuarios de la red directos e indirectos, la contaminación ambiental y los niveles de seguridad en la red. Para ello, el usuario podrá fijar el año horizonte e incluso modificar algunos de los parámetros que se establecen por defecto como, por ejemplo, los puntos de interés o la prioridad de actuación en un barrio o zona concreta de la ciudad. La salida de datos está conectada a la matriz de intervención que proporciona la optimización multiobjetivo, por lo que el “software” nos indica para cada una de las calles o segmentos de la red vial en qué año intervenir.

Conclusiones

La red vial, como uno de los mayores bienes patrimoniales de un país y base fundamental para su desarrollo económico y social, debe mantenerse en buen estado para reducir costes de transporte de personas y bienes, así como para no incurrir en sobrecostes por mantenimientos tardíos. En este sentido, la gestión actual del pavimento urbano se caracteriza, principalmente, por: (1) inexistencia de métodos eficientes para la detección de daños; (2) carencia de mantenimiento predictivo; y (3) ausencia de factores relacionados con la sostenibilidad social y medioambiental en la toma de decisiones.

Para hacer frente a estas deficiencias, las herramientas desarrolladas en este proyecto permitirán: (a) la automatización de las tareas de auscultación a través de la obtención de imágenes con cámaras convencionales y procesamiento posterior de las

mismas mediante técnicas de aprendizaje profundo, evitando la subjetividad derivada de la inspección visual y reduciendo tiempos y costes de la evaluación del pavimento; (b) la homogeneización de la predicción del estado del firme al incorporar, además de variables técnicas, variables relacionadas con el volumen de tráfico, la precipitación y la temperatura, favoreciendo la aplicación del “software” desarrollado a otras regiones geográficas; y (c) la incorporación de un modelo de optimización y toma de decisiones que incluye criterios como las emisiones de CO₂ o la proximidad a infraestructuras de desarrollo social y económico, con el fin de reducir los costes también desde una perspectiva social y medioambiental.

El “software” desarrollado es capaz de integrar las distintas herramientas desarrolladas con el fin de facilitar su uso a los usuarios, ya sea la propia administración o una empresa especializada en el mantenimiento de una red vial. Este “software”, además, ha sido diseñado con el fin de ofrecer al usuario una interfaz y una visualización gráfica sencilla de los resultados que se van obteniendo a lo largo de las diferentes etapas que se deben llevar a cabo para obtener una planificación óptima de las actuaciones de mantenimiento.

En este sentido, el “software” muestra, en primer lugar, cuál es el estado actual de la red tomando como input la grabación en vídeo del pavimento de un determinado tramo de la red o de la totalidad de la misma. Para ello, emplea principalmente las redes neuronales convolucionales entrenadas y estima el valor del PCI para cada sección de vía del área de estudio. A partir de la condición actual del pavimento, el “software” es capaz de predecir el estado futuro de la red vial en base a los modelos de predicción que incorpora. Finalmente, el “software” permite determinar cuál es la planificación óptima de las actuaciones de mantenimiento y rehabilitación en base a una optimización multiobjetivo que considera, entre otros criterios, la afección a los ciudadanos, las emisiones de CO₂ relacionadas con la actuación y la proximidad a puntos de interés.

Estos criterios, junto a los habituales criterios económicos y técnicos, proporcionarán una planificación eficiente y proactiva para mantener la red vial en el mejor estado posible, minimizando los costes y las afecciones a los ciudadanos y usuarios de la red, al mismo tiempo que se consigue un mantenimiento más sostenible.

Resumiendo, el proyecto SIMEPU ha permitido el desarrollo de una aplicación sencilla basada principalmente en una interfaz visual muy amigable para el usuario que permite:

- Identificar y cuantificar los deterioros en el pavimento de manera automática.
- Conocer el estado de la red en un futuro.
- Establecer una programación eficiente y proactiva de las actuaciones de mantenimiento y rehabilitación del pavimento urbano a medio-largo plazo.

Agradecimientos

Los autores quieren reconocer el trabajo de todo el equipo que conforma el Proyecto SIMEPU: Tatiana García Segura, David Llopís Castelló, José Ramón López Marco, Laura Montalbán Domingo, José Salvador Ortiz Sanjuán, Amalia Sanz Benloch, Mario Carreño Lara, Samuel Sáez García y Adrián Santes Genovés. También agradecen el apoyo mostrado en todo momento por los servicios técnicos del Ayuntamiento de Valencia.

Referencias bibliográficas

- I. AASHTO (1993). Guide for design of pavement structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- II. AASHTO (2011). Transportation asset management guide: a focus on implementation. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- III. AEC (2020). Guía para la rehabilitación y la gestión de los firmes de las carreteras dependientes de las administraciones locales. Asociación Española de la Carretera, Madrid.
- IV. ARAMBULA, E., GEORGE, R., XIONG, W., & HALL G. (2011). Development and validation of pavement performance models for the state of Maryland. *Transportation Research Record*, 2225(1), pp. 25-31.
- V. ASTM, 2018. Standard practice for roads and parking lots pavement condition index surveys (No. ASTM D6433-18). American Society for Testing and Materials, West Conshohocken.
- VI. BULL, A. (2003). Traffic Congestion: The Problem and how to Deal with it (No. 87). United Nations Publications.
- VII. CHA, Y. J., CHOI, W., & BÜYÜKÖZTÜRK, O. (2017). Deep learning-based crack damage detection using convolutional neural networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 32(5), pp. 361-378.
- VIII. CHAMBON, S., & MOLIARD, J. M. (2011). Automatic road pavement assessment with image processing: review and comparison. *International Journal of Geophysics*, 2011, doi:10.1155/2011/989354.
- IX. DONG, Q., HUANG, B., & RICHARDS S.H. (2014). Calibration and application of treatment performance models in a pavement management system in Tennessee. *Journal of Transportation Engineering*, 141(2), 04014076.
- X. ESPINOZA-VALAREZO, P.A., GARCÍA-SEGURA, T., MONTALBÁN-DOMINGO, L. & PELLICER, E. (2019). Development of a Decision Making Tool for the Pavement Maintenance Management under

- Sustainability Criteria: Application to Valencia (Spain). 10th International Structural Engineering and Construction Conference. Chicago, Illinois, USA.
- XI. FHWA (1999). Asset Management Primer. Washington, DC, USA.
- XII. FWA, T. F., CHAN, W. T. & HOQUE, K. Z. (2000). Multiobjective optimization for pavement maintenance programming. *Journal of Transportation Engineering*, 126(5), pp. 367-374.
- XIII. GEORGE, K. P., RAJAGOPAL, A. S. & LIM, L. K. (1989). Models for predicting pavement deterioration. *Transportation Research Record*, (1215), pp. 25-32.
- XIV. HAJJ, E. Y., LORIA, L. & SEBAALY, P. E. (2010). Performance evaluation of asphalt pavement preservation activities. *Transportation Research Record*, 2150(1), pp. 36-46.
- XV. HASSAN, R., LIN, O. & THANANJEYAN, A. (2015). A comparison between three approaches for modelling deterioration of five pavement surfaces. *International Journal of Pavement Engineering*, 18(1), pp. 26-35.
- XVI. LLOPIS-CASTELLÓ, D., GARCÍA-SEGURA, T., MONTALBÁN-DOMINGO, L., SANZ-BENLLOCH, A. & PELLICER, E. (2020). Influence of pavement structure, traffic, and weather on urban flexible pavement deterioration. *Sustainability*, 12(22), 9717, <http://dx.doi.org/10.3390/su12229717>
- XVII. MAEDA, H., SEKIMOTO, Y., SETO, T., KASHIYAMA, T. & OMATA, H. (2018). Road damage detection using deep neural networks with images captured through a smartphone. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 33(12), pp. 1127-1141, <https://doi.org/10.1111/mice.12387>.
- XVIII. MENESES, S. & FERREIRA, A. (2015). Flexible pavement maintenance programming considering the minimisation of maintenance and rehabilitation costs and the maximisation of the residual value of pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(7), pp. 571-586.
- XIX. MOHD HASAN, M. R., HILLER, J.E., & YOU, Z. (2016). Effects of mean annual temperature and mean annual precipitation on the performance of flexible pavement using ME design. *International Journal of Pavement Engineering*, 17(7), pp. 647-658.
- XX. MOREIRA, A.V., TINOCO, J., OLIVEIRA, J.R. & SANTOS, A. (2018). An application of Markov chains to predict the evolution of performance indicators based on pavement historical data. *International Journal of Pavement Engineering*, 19(10), pp. 937-948.
- XXI. OSORIO-LIRD, A., CHAMORRO, A., VIDELA, C., TIGHE, S. & TORRES-MACHI, C. (2018). Application of Markov chains and Monte Carlo simulations for developing pavement performance models for urban network management. *Structure and Infrastructure Engineering*, 14(9), pp. 1169-1181.
- XXII. PARK, S., BANG, S., KIM, H. & KIM, H. (2019). Patch-based crack detection in black box images using convolutional neural networks. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 33(3), 04019017.
- XXIII. PENADÉS-PLÀ, V., GARCÍA-SEGURA, T., MARTÍ, J. & YEPES, V. (2016). A review of multi-criteria decision-making methods applied to the sustainable bridge design. *Sustainability*, 8(12), 1295.
- XXIV. QIAO, Y., FLINTSCH, G.W., DAWSON, A.R. & PARRY, T. (2013). Examining effects of climatic factors on flexible pavement performance and service life. *Transportation Research Record*, 2349(1), pp. 100-107.
- XXV. RAGNOLI, A., DE BLASIIS, M. & DI BENEDETTO, A. (2018). Pavement distress detection methods: A review. *Infrastructures*, 3(4), 58.
- XXVI. SANTERO, N. J. & HORVATH, A. (2009). Global warming potential of pavements. *Environmental Research Letters*, 4(3), 034011.
- XXVII. SHI, Y., CUI, L., QI, Z., MENG, F. & CHEN, Z. (2016). Automatic road crack detection using random structured forests. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(12), pp. 3434-3445.
- XXVIII. TORRES-MACHI, C., PELLICER, E., YEPES, V. & CHAMORRO, A. (2017). Towards a sustainable optimization of pavement maintenance programs under budgetary restrictions. *Journal of Cleaner Production*, 148, pp. 90-102.
- XXIX. WANG, H., CHEN, Z., & SUN, L. (2013). Pavement roughness evaluation for urban road management. In *ICTE 2013: Safety, Speediness, Intelligence, Low-Carbon, Innovation*, pp. 2709-2713.
- XXX. WU, Z. & FLINTSCH, G. W. (2009). Pavement preservation optimization considering multiple objectives and budget variability. *Journal of Transportation Engineering*, 135(5), pp. 305-31.
- XXXI. ZOU, Q., CAO, Y., LI, Q., MAO, Q. & WANG, S. (2012). CrackTree: Automatic crack detection from pavement images. *Pattern Recognition Letters*, 33(3), pp. 227-238. ■



acceso
al trabajo
completo

Estudio de riegos bituminosos de adherencia para rehabilitación de firmes flexibles fresados

Study of asphalt tack coats in the rehabilitation of milled flexible pavements

José Julián RIVERA

Subdirector de LEMaC, Centro de Investigaciones Viales UTN FRLP – CIC PBA.
Universidad Tecnológica Nacional. Fac. Reg. La Plata (Argentina).

RESUMEN

En rehabilitaciones con capas bituminosas, se aplica un riego de adherencia como interfase. Si previamente se fresa superficialmente, se modifica la textura incidiendo en su dotación, dado un incremento de superficie de interfase que requeriría mayores tasas y formación de surcos, los cuales producirían escurrimiento del riego, limitándolas. Es necesaria una solución de compromiso mecánicamente óptima. En su estudio se aplica un procedimiento para elaborar especímenes y ensayarlos, estableciéndose las dotaciones por proporcionalidades respecto del incremento de la superficie de la interfase debido al fresado. Para ello, se desarrolla un modelo para estimar ese incremento mediante una adaptación del Ensayo de Parche de Arena. Se estima con ensayos estáticos la dotación óptima en términos del incremento de superficie, llegándose a un modelo de aplicación en campo asociado. La investigación se realiza sobre materiales de Argentina. Como validación se lleva a cabo el análisis a fatiga y aplicaciones en obra en Argentina y España.

PALABRAS CLAVE: Rehabilitación de firmes, Fresado, Riegos de adherencia, Parche de arena.

ABSTRACT

In rehabilitations with asphalt layers, a tack coat is applied as an interface. If it is previously milled superficially, the texture is modified, affecting its dosage; given an increase in interface surface that would require higher dosages and formation of grooves that would produce runoff of bitumen emulsion, limiting them. A mechanically optimal compromise solution is necessary. In its study, a procedure is applied to elaborate specimens and to test them; establishing the dosages by proportionalities concerning the increase in the surface of the interface due to milling. For this, a model is developed to estimate this increase through an adaptation of the Sand Patch Test. The optimal dosage in terms of the increase in surface area is estimated with static tests, arriving at a field application model associated. The research is carried out on materials from Argentina. As validation, fatigue analysis, and on-site applications are carried out in Argentina and Spain.

KEY WORDS: Pavement rehabilitation, Milling, Tack coat, Sand patch test.

1. Desarrollo del modelo de aplicación

Durante la explotación de un firme flexible, se desarrollan actividades dirigidas a su rehabilitación, eliminándose en ocasiones parte de la capa de rodamiento por medio de técnicas de fresado^(i,ii,iii). Esta tarea da lugar a distintos grados de textura, diferentes a la de la superficie original, pues esta última, en términos relativos, puede considerarse "lisa"^(iv). Luego, previo a la colocación de la capa de refuerzo, corresponde disponer un riego de adherencia de una emulsión bituminosa para generar una adecuada interfase^(v,vi), a fin de que, si el firme existente presenta una buena condición estructural, las tensiones y deformaciones generadas por efecto del tráfico no afecten a la vida útil prevista^(vii,viii).

Existen pocos estudios que hayan encarado la temática, por lo que se realiza el trabajo que se presenta en el marco de una tesis doctoral en ingeniería de materiales, cuya versión completa se puede descargar en <https://ria.utn.edu.ar/handle/20.500.12272/3581>.

1.1. Materiales y métodos abordados en el desarrollo del modelo

1.1.1. El riego de adherencia

El vínculo entre la superficie existente y la capa de refuerzo en caliente aplicada depende fundamentalmente de la cantidad de ligante bituminoso residual del riego efectuado con una emulsión bituminosa (parámetro mediante el cual se expresa la dotación en cuestión)^(ix,x). La Dirección Nacional de Vialidad de la Argentina (DNV) estipula que la emulsión a utilizarse sea del tipo catiónica de curado rápido, con una dotación que arroje un resultado de al menos 0,7 MPa en el ensayo de adherencia entre capas de rodadura UNE-EN 12697-48 (ensayo de SBT)^(xi).

1.1.2. El fresado en la rehabilitación

Los equipos de fresado dan origen a diversos resultados de textura superficial (fresado estándar, fino y microfresado), lo que puede dar lugar a una escala de casos patrones de fresado basados en diversa bibliografía de consulta^(xii,v,vi,viii,xii).

1.1.3. El análisis de la respuesta mecánica en la interfase

El análisis estructural de la interfase que se realice se encuentra condicionado al modelo estructural que se emplee^(xiii,xiv), por lo que un adecuado modelado de la interfase lleva a optimizar los costos de una rehabilitación^(xv) si considera la incidencia del fresado y sus características en cada caso en particular^(xvi). Los modelos mecánicos de interfases expresan la relación entre el desplazamiento de corte a lo largo del plano de interfase y los esfuerzos normales y de corte. Ante sollicitaciones estáticas hasta rotura, Romanoschi (1999) obtiene gráficas de las curvas típicas de esfuerzo de corte vs desplazamiento^(xvii). Dada la naturaleza cíclica de la carga en las interfases de un firme,



Figura 1. Modelo constitutivo simplificado.

solo los sectores elásticos y el sector de fricción del ensayo estático hasta rotura son empleables en su descripción, pudiéndose simplificar el análisis al acotarlo a una temperatura de referencia representativa y al considerar que solo en los casos sin riego de adherencia se observa que el módulo de reacción al corte K difiere fuertemente con el nivel del esfuerzo normal aplicado. Se puede pensar entonces en el modelo resumido de la Figura 1, con un punto de falla al Esfuerzo Máximo al Corte (S_{max}) en un determinado Desplazamiento al Corte (TD), a partir del cual comienza la interacción de fricción simple, caracterizada por el coeficiente de fricción μ , cuya determinación queda por fuera del alcance del presente trabajo.

1.1.4. El ensayo al corte de la interfase

A nivel mundial, se observan numerosos ensayos de interfases^(xviii,xviii). No obstante, los ensayos de corte directo puro representan los más comunes en la aplicación del desplazamiento de corte y el registro del esfuerzo de corte^(xvii,xix). El ensayo seleccionado para su aplicación en el presente trabajo es el que solicita al corte directo por tracción en forma paralela a la interfase del riego de adherencia (ver Figura 2).

En función de experiencias propias previas, se decide generar el esfuerzo cortante en el plano a evaluar a una velocidad de avance controlada de 1,27 mm/min y establecer la temperatura de ensayo en los 20°C, por considerarse representativa para la zona central



Figura 2. Ensayo seleccionado para el estudio.

de Argentina y de fácil obtención mediante sistemas sencillos de acondicionamiento.

El equipo de estudio liderado por D'Andrea (2013), revela que con el compactador Marshall se pueden confeccionar probetas dobles cilíndricas, aplicándose la compactación sólo en la cara superficial. Entre ambas capas de este tipo de probetas, se materializa el riego de adherencia, con un curado estandarizable en laboratorio⁽⁹⁾, mediante el uso de estufa de tiro forzado a temperaturas cercanas a los 60°C. Se establece para este trabajo que las probetas dobles a ensayarse se moldeen con espesores de 50 mm, tanto de la base como de la capa de refuerzo. En el ensayo, para permitir el desarrollo de la interfase fresada, se decide separar los zunchos que toman la parte superior e inferior de la probeta doble unos 30 mm, generándose, además de la deformación propia registrada en la interfase, una deformación relacionada con la probeta en este sector. Por esto, las deformaciones tangenciales y las tensiones de corte resultan diferentes a las obtenibles con el ensayo de corte SBT (de referencia), en el cual los zunchos se encuentran separados una distancia mínima. Dado lo expuesto, los resultados de TD y de Smax obtenidos en este trabajo solo son comparables de forma relativa entre sí y no con los generados mediante otras metodologías de ensayo.

1.1.5. Determinación del incremento de área de interfase por fresado

Al contar con los resultados de los incrementos de área $\Delta(\text{Área})$ registrados ante diversas combinaciones de ancho y profundidad del surco (es decir, sus valores medios y dispersiones), por ejemplo mediante simulación numérica, se pueden hallar los modelos de regresión que permitan la estimación en futuras aplicaciones de dicho $\Delta(\text{Área})$ a partir de los diámetros obtenibles del empleo de una metodología de ensayo análoga a la del Parche de Arena⁽⁹⁾. Siguiéndose esta línea de trabajo, se logra establecer que la fórmula que permite estimar el Coeficiente del Incremento del Área (CIA), es decir, la proporción entre la superficie en la interfase fresada respecto de dicha superficie en los casos de interfase lisa, en función del Diámetro del Parche de Arena (DPA) resultante para un volumen de arena de 40 cm³, es $\text{CIA} = 5,03 \text{ DPA} - 0,41$. La correlación es corroborada en laboratorio sobre probetas de los casos representativos de fresado establecidos, simulándose mediante el uso de una hoja diamantada los distintos grados de fresado.



Figura 3. Disposición del riego lograda en laboratorio.

1.2. Resultados y discusión del análisis ante sollicitaciones estáticas

1.2.1. Contenido óptimo de riego de adherencia para superficie no fresada

Para poder analizar la influencia del incremento de superficie de la interfase en los sistemas abordados, se debe contar primero con una dotación de riego de adherencia para el caso de la no existencia del fresado en la interfase (lisa). Para eso, se selecciona una emulsión bituminosa catiónica de corte rápido a ser empleada y una mezcla bituminosa tanto para la constitución del sustrato inferior como superior del tipo Concreto Asfáltico en Caliente convencional Denso con Tamaño Máximo de sus agregados de 19 mm (CAC-D19). Dados los entornos de dotaciones recomendados por la bibliografía de consulta, se deciden analizar los distintos contenidos de riego de adherencia.

Puede deducirse así un máximo valor de Smax de 0,325 MPa, asociado a una TD de 11,0 mm, alcanzable con la dotación de 0,25 l/m². Dado que la especificación técnica aplicable en la jurisdicción nacional en Argentina establece una Smax de 0,7 MPa de acuerdo al Ensayo de SBT⁽⁹⁾, que posee diferentes características que el aplicado para el estudio, surge la duda de si los resultados obtenidos mediante el ensayo instrumentado son comparables al especificado. Por lo expresado, se realiza el moldeo de un juego de probetas con la dotación óptima establecida, obteniéndose los resultados de Smax levemente superiores a 0,9 MPa; por lo que puede deducirse que corresponden a los de una situación que implicaría el cumplimiento de los valores establecidos por el pliego de DNV⁽⁹⁾.

1.2.2. Análisis mediante ensayos en casos con superficies fresadas

Resta analizar desde el punto de vista mecánico si en el caso de las superficies fresadas resulta necesario incrementar la dotación en forma proporcional al incremento de área generado por la textura resultante después del fresado. Esta duda surge, entre otros aspectos, porque es probable que un incremento excesivo en la dotación del riego de adherencia no se distribuya de forma homogénea sobre la superficie fresada, debido al grado de fluidez de la emulsión, pudiéndose generar un depósito de mayor espesor en el valle de los surcos. Para analizar esto, se procede en laboratorio, sobre una probeta con fresado simu-

lado, a la aplicación con pincel de la dotación de riego de adherencia incrementada en proporción al incremento del área de contacto en la interfase. Dicha probeta es luego aserrada, procediéndose a su observación con una lupa Olympus SZ61, con un aumento aproximado de 45x, lográndose imágenes como las de la Figura 3. Se observa cómo la hipótesis efectuada tendría un grado de validez, ya que resulta claro que la deposición del riego en los valles del fresado resulta superior a la que se obtiene en sus crestas.

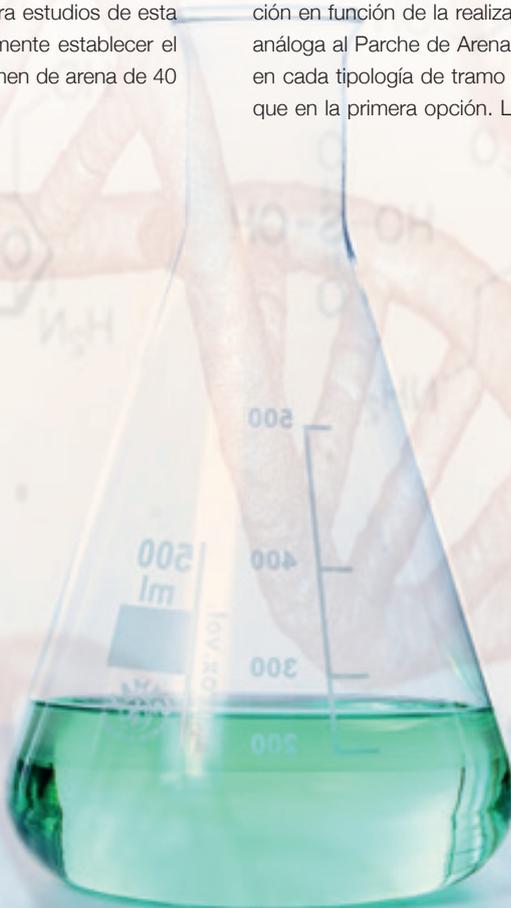
Paso seguido se estudian situaciones que representan un incremento de esa dotación en 3/3, 2/3, 1/3 y 0/3 de proporción del incremento del área de contacto en la interfase por el fresado (Situación 1 a la Situación 4, respectivamente), en los casos de simulación de fresado establecidos. Se procede al moldeo de las probetas dobles al ser analizadas. Una vez moldeadas las bases, se procede al aserrado superficial de las probetas simulándose el fresado, a la aplicación de los riegos y al moldeo de las capas superiores. Se realiza su ensayo mediante el procedimiento desarrollado, destacándose que, dado que la flexión principal del firme se da en su sentido longitudinal y que el fresado presenta su superficie dentada también en este sentido, se decide efectuar los ensayos con la probeta doble dispuesta de acuerdo a esa orientación.

Los resultados obtenidos permiten desarrollar tablas en las que se vuelcan los valores promedio de S_{max} y TD, respectivamente, para los correspondientes valores de coeficiente de incremento del riego (CI), en cada caso y cada Situación. Dado que se obtiene para todos los casos que la Situación 3 implica los CI óptimos, se puede proceder ahora a establecer a estos valores como los Coeficientes de Incremento de Riego (CIR); es decir, aquellos finalmente utilizables en el modelo resultante de toda la experiencia para establecer la Dotación de Riego Incrementada (DRI) a partir de la Dotación de Riego para la interfase lisa (DR) mediante la fórmula $DRI = CIR \cdot DR$. Para llegar a los DRI en función de los DPA, resta entonces correlacionar los valores obtenidos para cada caso con los CI óptimos establecidos (asumidos ahora como los DRI). Se puede ajustar por regresión a la nube de puntos una función del tipo potencial, la cual permite obtener un coeficiente de determinación R^2 de 0,99, acorde al umbral empírico generalmente establecido para estudios de esta índole de $0,90^{(90)}$. La fórmula que permite finalmente establecer el CIR en función del DPA, resultante para un volumen de arena de 40 cm^3 , es $CIR = 2,014 \cdot DPA - 0,184$.

1.3. Forma de empleo en obra de la metodología de análisis resultante

Una idea de partida con que se cuenta es que, en una obra, es posible que se registren diversos tramos homogéneos de superficie fresada a ser reforzada, ya sea porque se realiza esta tarea con diferentes equipos, con un mismo equipo sometido a mantenimiento (cambio de puntas de fresado, modificación del tambor de fresado, etc.), por la variabilidad misma en el empleo de dicho equipo y de su operador, etc.

La metodología de análisis resultante, a partir de esta consideración, puede emplearse allí al menos de tres formas diferentes. La primera forma se asocia directamente con los pasos llevados a cabo en las experiencias realizadas. Es decir, se parte de conocer el material a ser hallado en obra y el que será aplicado como refuerzo. Esto permite generar en el laboratorio pastones de prueba representativos de dichos materiales. A partir de éstos, se determina con probetas dobles, o mediante alguna otra vía válida, la dotación óptima a utilizarse en el caso de una interfase entre superficies lisas. Luego, en obra, se procede al ajuste de dicha dotación en función de la realización de mediciones con la metodología análoga al Parche de Arena y la aplicación del modelo desarrollado. Esto se aplica en cada tipología de tramo homogéneo registrada. La segunda forma se basa en que en cada tramo representativo de los materiales de la obra se extraigan testigos de la carpeta de rodamiento existente. Se confeccionan con éstos y con el material a ser empleado en el refuerzo las probetas dobles necesarias. Con ellas se determina el contenido óptimo de riego de adherencia para la interfase entre superficies lisas. Acto seguido, se efectúa el ajuste de dicha dotación en función de la realización de mediciones con la metodología análoga al Parche de Arena y la aplicación del modelo desarrollado en cada tipología de tramo homogéneo registrada en obra, al igual que en la primera opción. La tercera forma puede resultar un poco



más compleja y atractiva de aplicar. Se basa en instrumentar “tramos de prueba” del fresado. Así, en cada uno de éstos, representativo de los materiales de la obra y del fresado, se extraen testigos de la carpeta de rodamiento existente. Simultáneamente, se realizan en los mismos las mediciones correspondientes con la metodología análoga al Parche de Arena desarrollada. Luego, se confeccionan, con los testigos y con el material a ser empleado en el refuerzo, las probetas dobles necesarias y se determina el contenido óptimo de riego de adherencia para la interfase con esa textura de fresado. Esto permite entonces aplicar sobre esa dotación los modelos desarrollados en forma inversa, de manera tal que se establezca virtualmente cuál sería la dotación óptima de riego de adherencia si el ensayo se hubiera realizado en el caso de la interfase lisa. Finalmente, se ajusta dicha dotación en función de la realización de mediciones con la metodología análoga al Parche de Arena y la aplicación del modelo desarrollado, en cada tipología de tramo homogéneo registrada en obra, al igual que en la primera opción.

Estas formas de empleo no serían en todos los casos alternativas factibles entre las cuales optar, pues es posible que en ciertas aplicaciones los condicionantes existentes lleven a la posibilidad de uso de solo una o dos de estas alternativas. El criterio ingenieril debe utilizarse para decidir en tal sentido. Como un ejemplo, puede mencionarse un caso en el cual el uso de la primera alternativa de aplicación sería el más indicado. Se trata de obras nuevas, en las cuales, por razones de terminación superficial o corrección de espesores, se deba fresar en sectores parte del espesor de una base bituminosa, previo a la colocación de la capa de rodamiento bituminosa. En dicha situación, la determinación de la dotación óptima de riego de adherencia se obtendría posiblemente a través de ensayos de probetas con interfase lisa durante los estudios previos a la realización de la obra. Así, se aplicarían las correcciones en la dotación del riego cuando deban resolverse los sectores mencionados. En cambio, un ejemplo en el cual no sería conveniente emplear la primera alternativa sería el caso de obras de refuerzo de firmes muy envejecidos, en las cuales el remoldeo de una mezcla en laboratorio para la confección de las bases de las probetas podría no resultar representativo.

1.4. Análisis de respuesta al corte a fatiga

Para esta parte del estudio, se decide tomar una textura de muestra, analizándose su respuesta a fatiga en las cuatro Situaciones que fueran descriptas para el estudio basado en solicitaciones estáticas (Situación 1 a Situación 4); y, de ese modo, observar si el contenido óptimo establecido por ambas vías se condice.

Para conducir los análisis a fatiga, se toma de la recopilación bibliográfica aquella sistemática de ensayo que se presume refleja de mejor manera las condiciones de campo y resulta de aplicación probable a los propósitos de este trabajo. El ensayo en cuestión es el propuesto por Romanoschi (1999), denominado *Shear Fatigue Test of the Asphalt-to-Asphalt Interfaces*^(v). En ese ensayo, dada la inclinación adoptada, la carga cíclica vertical P se descompone en una carga normal N y en una carga de corte tangencial a la interfase en

análisis T. Como en este caso la inclinación de la probeta es cercana a los 25°, se obtiene una relación 2:1 entre la fuerza N y la fuerza T.

Para efectuar este ensayo, se cuenta con el equipo destinado al ensayo de módulo ante cargas cíclicas conforme a la Norma UNE-EN 12697-26, el cual puede ser empleado mediante algunas modificaciones menores a tales efectos. Dicho equipo se configura para otorgar una frecuencia dada de cargas. Las probetas dobles cúbicas a ser ensayadas tienen 10 cm por lado, lo que se considera una dimensión mínima representativa de las magnitudes de fresado. Para establecer la magnitud del pico de carga, se puede considerar el rango de la distribución de esfuerzos de corte en interfases de variadas estructuras de firmes, propuestas y analizadas mediante la técnica de los elementos finitos por Giovanon y Buono (2008), las que oscilan entre 0,3 y 0,8 MPa^(xxiii). Dado que la máxima carga cíclica que puede otorgar el equipo con que se cuenta es de 500 kg, se decide, para obtener una tensión de corte en la interfase de 0,35 MPa en el caso de un material ideal indeformable que transmitiría a la interfase de forma uniforme toda la carga aplicada, establecer una inclinación de ensayo de la probeta de 45° (obteniéndose una situación más desfavorable que en el ensayo de *Shear Fatigue Test of the Asphalt-to-Asphalt Interfaces* por establecerse una relación de 1:1 entre N y T) y aplicar esa carga máxima. El esquema del sistema de ensayo adaptado a los efectos del desarrollo de este trabajo puede observarse en la Figura 4, con los surcos del fresado dispuestos en dirección al plano de deslizamiento a generarse durante el ensayo.

Para la confección de las probetas cúbicas dobles a ser ensayadas, se implementa el siguiente procedimiento:

- Moldeo con la mezcla bituminosa patrón, que presenta una Densidad Marshall de Referencia y con una compactación mediante el equipo Roller Compact, de dos probetas prismáticas de 30 cm x 30 cm x 5 cm.
- Simulación del fresado mediante aserrado de la superficie de ambas probetas.

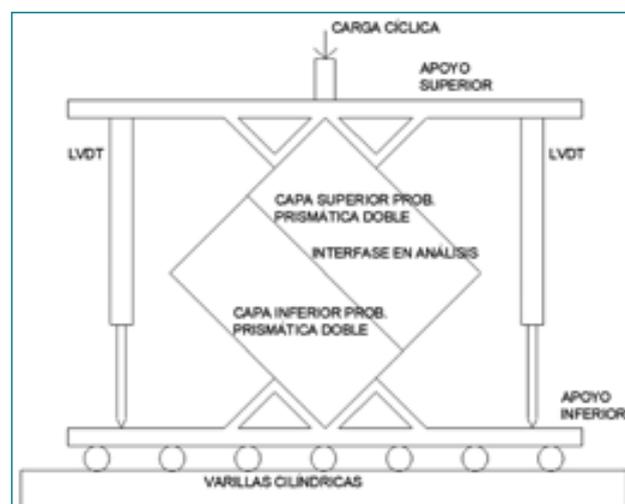


Figura 4. Esquema de ensayo de fatiga de la interfase adaptado.

- Aplicación de las dotaciones de riego de las Situaciones 1 a 4 sobre las probetas, cubriéndose media probeta con cada dotación.
- Moldeo de la capa superior sobre ambas probetas en un espesor de 5 cm, con la mezcla patrón y nuevamente mediante compactación con el equipo de Roller Compact.
- Aserrado de 3 probetas cúbicas para cada Situación de 10 cm de lado.
- Numeración de las probetas mediante la fórmula SX-Y, donde la X corresponde a la Situación y la Y al Número de Probeta para esa Situación.

1.4.1. Resultados del análisis a fatiga

Primera serie de ensayos a fatiga

Se decide ensayar como primera serie a las probetas S₁₋₁, S₂₋₁, S₃₋₁ y S₄₋₁, a la temperatura ya empleada en los ensayos estáticos de 20°C, con una frecuencia de aplicación de la carga de 1 Hz y con 100.000 repeticiones. En la Figura 5 se observan imágenes tomadas durante el ensayo de una de las probetas. En la imagen de la derecha se ve una probeta dentro de la cámara de acondicionamiento y en la de la izquierda el equipo completo (que incluye el regulador neumático de carga, la adquisidora de datos y la computadora con el programa de regulación del ensayo). Las probetas ensayadas dejan observar que la evolución en la deformación vertical registrada tiene su correlato en el desplazamiento de ambas capas en la interfase. En la Figura 6 se observan las curvas de evolución del desplazamiento en la interfase para la primera serie de probetas (calculado a partir de la deformación vertical registrada) *versus* los ciclos de carga.

Si bien las curvas volcadas en la Figura 6 permiten observar cierta tendencia en los resultados, para una más clara interpretación de estos se decide definir una Pendiente de la Curva de Desplazamiento (PCD) que se calcula según la Ecuación 1.

$$PCD = \frac{D_{100} - D_{50}}{50} \quad (1)$$

donde PCD, ya definida con anterioridad, se expresa en mm/10³ ciclos, D₁₀₀ es el desplazamiento a los 100.000 ciclos de carga (mm) y D₅₀ es el desplazamiento a los 50.000 ciclos de carga (mm).

A partir de la definición de este parámetro, se puede confeccionar la Tabla 1, en la cual se vuelcan los resultados obtenidos para la primera serie de ensayos.

Los resultados muestran que, si bien la D100 en la probeta S3-1 resulta levemente superior a la de la probeta S4-1, las PCD obtenidas marcan una tendencia hacia el mínimo para la probeta S3-1. Esto se condice con los resultados obtenidos ante las sollicitaciones estáticas.



Figura 5. Imágenes durante el ensayo a fatiga de una de las probetas cúbicas.

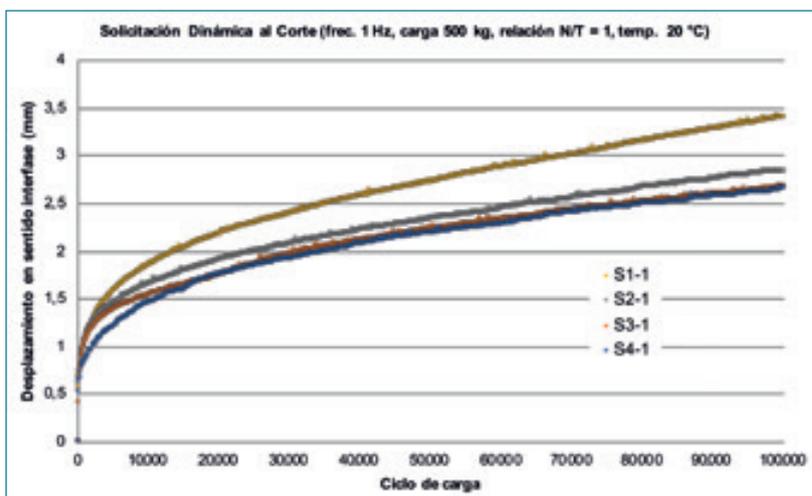


Figura 6. Curvas desplazamiento *versus* ciclos de carga para la primera serie.

Probeta	D ₅₀ (mm)	D ₁₀₀ (mm)	PCD (mm/10 ³ ciclos)
S ₁₋₂	2,73	3,41	0,0136
S ₂₋₂	2,35	2,85	0,0100
S ₃₋₂	2,23	2,68	0,0089
S ₄₋₂	2,20	2,66	0,0091

Tabla 1. Resultados para la primera serie de probetas.

Segunda serie de ensayos a fatiga

Se observa que la temperatura de ensayo y la frecuencia de carga seleccionadas requerirían de una cantidad de repeticiones en las sollicitaciones para llevar a las probetas a situaciones cercanas a la rotura marcadamente por encima de las analizadas. En tal sentido, cabe señalar que, para la frecuencia establecida, los 100.000 ciclos de carga insumen más de 30 horas de ensayo por probeta, incluyéndose su acondicionamiento. Se decide ensayar la segunda serie de probetas a una temperatura de 40°C, habitual en otros estudios sobre sistemas que involucran mezclas bituminosas para observar el comportamiento esperable a mayores temperaturas. El resto de los parámetros, como la frecuencia de cargas y su amplitud, se decide dejarlos constantes. Al ensayar las probetas, se obtienen diferentes comportamientos. En las probetas ensayadas se observa visualmente un mejor comportamiento ante las menores dotaciones de riego de adherencia analizadas. En la Figura 7 se observan las curvas de evolución del desplazamiento en la interfase (calculado a partir de la deformación vertical registrada) versus los ciclos de carga para la segunda serie de probetas. En dicha figura se puede ver la notoria diferencia de resultados respecto de los obtenidos para los 20°C. Para permitir la mejor observación de las diferencias relativas, se decide analizar la cantidad de ciclos que se requieren para que en cada probeta se genere un desplazamiento de 5 mm (TD_{5mm}) y de 10 mm (TD_{10mm}). La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos en tal sentido. Puede observarse cómo la cantidad de ciclos para los TD_{5mm} resulta óptima para la Situación 3. En cambio, al observar los ciclos para los TD_{10mm}, se ve que la situación óptima se da claramente en la probeta S₄₋₂. Esto podría interpretarse como un indicio en cuanto a que, a temperaturas elevadas de operación, al menos para los materiales analizados, el mejor comportamiento de la interfase se da con menores dotaciones de riego de adherencia que a temperaturas de operación intermedias. De todos modos, también es probable, dado las fisuras observadas en las probetas, que a ese nivel de desplazamientos relativos el sistema se encuentre ya en falla. Por lo expuesto, los resultados de los ensayos efectuados con esta serie de probeta estarían nuevamente en coincidencia con los obtenidos de manera estática.

Tercera serie de ensayos a fatiga

Se decide ensayar la tercera serie de probetas a una temperatura de 5°C, habitual en otros estudios sobre sistemas que involucran mezclas bituminosas para observar el comportamiento esperable a bajas temperaturas. También se modifica la frecuencia de cargas, estableciéndola en 0,5 Hz. En la Figura 8 se observan las curvas de evolución del desplazamiento en la interfase (calculado a partir de la deformación vertical registrada) versus los ciclos de carga para la tercera serie de probetas. En esta imagen se ve que las curvas de las probetas S₁₋₃ y S₂₋₃ no se muestran hasta los 100.000 ciclos debido a inconvenientes registrados en

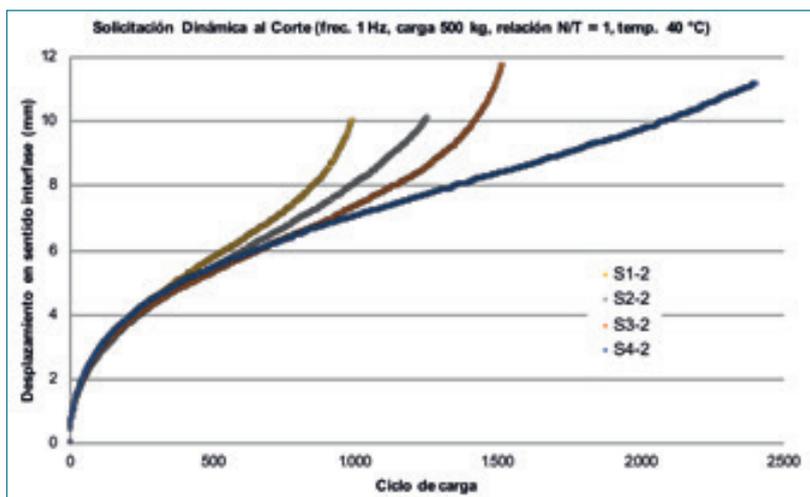


Figura 7. Curvas desplazamiento versus ciclos de carga para la segunda serie.

Probeta	Para TD _{5mm} (ciclos)	Para TD _{10mm} (ciclos)
S ₁₋₂	374	990
S ₂₋₂	414	1246
S ₃₋₂	436	1422
S ₄₋₂	393	2081

Tabla 2. Resultados para la segunda serie de probetas.

el equipo adquirente de datos durante su ensayo; para el ensayo de las probetas S₃₋₃ y S₄₋₃, esos inconvenientes pudieron ser solucionados. Para permitir la mejor observación de las diferencias relativas, se decide volcar en la Tabla 3 los desplazamientos en la interfase para 35.000 ciclos (D₃₅), 50.000 ciclos (D₅₀) y 100.000 ciclos (D₁₀₀). Como puede observarse, a 5°C los resultados obtenidos permitirían ratificar que la situación óptima es la Situación 3, en forma coincidente con lo establecido mediante los ensayos estáticos y los ensayos dinámicos a 20°C y 5°C.

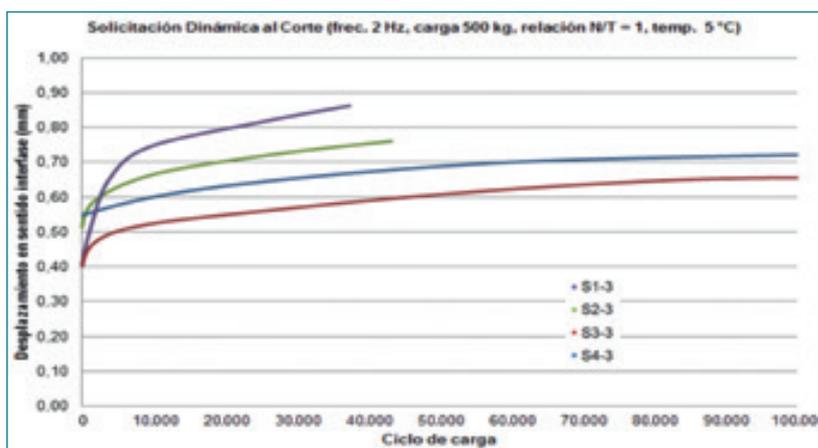


Figura 8. Curvas desplazamiento versus ciclos de carga para la tercera serie.

Probeta	D ₃₅ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₁₀₀ (mm)
S ₁₋₂	0,86		
S ₂₋₂	0,74		
S ₃₋₂	0,57	0,60	0,65
S ₄₋₂	0,66	0,69	0,72

Tabla 3. Resultados para la tercera serie de probetas.

2. Aplicación a casos reales de la metodología desarrollada

Para analizar si lo modelado en laboratorio se ajusta a lo observable en la práctica, se decide efectuar estudios sobre dos obras viales en las cuales se realice el fresado de la capa de rodamiento existente, con la presencia de un espesor remanente de mezcla bituminosa a ser reforzada. Uno de los estudios se realiza sobre materiales idénticos a los empleados en las experiencias en laboratorio, en una obra vial situada en la provincia de Buenos Aires (Argentina). El otro se realiza sobre materiales diferentes a los analizados en laboratorio y mediante la aplicación de una sistemática de ensayo distinta, relacionada con una obra efectuada en la provincia de Lérida (España).

2.1. Análisis de un caso en la Ruta Provincial N° 215 en Coronel Brandsen

La Ruta Provincial N° 215 (RP215) es una carretera en el noreste de la Provincia de Buenos Aires que en diciembre de 2017 se encontraba sometida a una obra de ampliación y rehabilitación de calzada en su tramo entre las localidades de Coronel Brandsen y San Miguel del Monte, a cargo de la empresa ICF y bajo la jurisdicción de la Dirección de Vialidad de la Provincia de Buenos Aires (DVBA). Entre los ítems de obra se encuentran los de fresado de la carpeta bituminosa existente en la calzada en sus 5 cm superficiales (dejándose 8 cm de mezcla bituminosa remanente), la aplicación de un riego de adherencia bituminoso y la colocación de una capa bituminosa de refuerzo tipo CAC-D19; razón por la cual se la ha seleccionado para efectuar el análisis comparativo en obra respecto de lo observado en laboratorio. Como paso inicial, se efectúan las determinaciones con la metodología análoga a la del Ensayo de Parche de Arena desarrollada, utilizándose el volumen de 40 cm³ de arena establecido como óptimo. En la Figura 9 se observa una imagen general con las determinaciones de DPA realizadas (izda.) y otra de extracción de los testigos (dcha.).

Paso seguido, se efectúa la extracción en una misma hilera de fresado, correspondiente al sector en el cual se realizaron las determinaciones anteriormente señaladas, de testigos de 10 cm de diámetro de la mezcla bituminosa remanente. Los testigos extraídos en la obra son acondicionados, mediante su corte con sierra circular diamantada, en un espesor de 5 cm, análogo al de las bases de las probetas dobles moldeadas en las experiencias en laboratorio. Durante esta tarea, se tiene especial cuidado en generar un plano de corte paralelo al de fresado. Al material sobrante del acondicionamiento por corte de los testigos se le realiza la determinación del contenido de bitumen y la recuperación de los agregados, mediante la aplicación combinada de una centrífuga de plato y una centrífuga de vasos, de acuerdo a lo establecido por el procedimiento LEMaC-A01/06^(XXIV). Se obtiene como resultado un contenido de



Figura 9. Determinaciones análogas al Ensayo de Parche de Arena efectuadas.

bitumen del 4,8%. Los áridos recuperados de la muestra dejan apreciar visualmente que se trata de una mezcla bituminosa típica de la zona, elaborada con árido granítico de trituración. A estos áridos se les determina su curva granulométrica, la cual se compara con las curvas límites de una mezcla CAC-D19 de DNV⁽⁹⁾, estableciéndose que encuadran perfectamente. Por todos los datos recabados, se llega a la conclusión de que la mezcla bituminosa remanente en obra es una típica mezcla CAC-D19 de la zona, con similares características a la mezcla bituminosa utilizada en las experiencias de laboratorio.

Si bien para la obra se cuenta con una dotación del riego de adherencia a ser aplicado, constituido por una emulsión bituminosa CRR-1, se plantea para el análisis comparativo considerar las dotaciones utilizadas en las experiencias en laboratorio como una vía para establecer la validación de los resultados obtenidos. Por esto, se decide moldear probetas dobles que tienen como base los testigos extraídos y en las cuales se emplean para el riego de adherencia y la capa de revestimiento los mismos materiales utilizados durante las experiencias de laboratorio previas. El análisis se realiza en laboratorio con la aplicación de tres dotaciones, de forma tal de ver si se ratifican los resultados obtenidos en las experiencias previas, correspondientes a las situaciones de:

- **Dotación I:** dotación de riego de adherencia óptima establecida para la interfase en superficies lisas (es decir, la Situación 4).
- **Dotación II:** dotación de riego de adherencia establecida mediante la fórmula desarrollada para estimar el CIR (es decir, la Situación 3).

- Dotación III: dotación de riego de adherencia establecida mediante el incremento directo de la superficie de contacto en la interfase, es decir, empleando el CIA (Situación 1).

Al observar las probetas ensayadas, se puede ver cómo con la Dotación I la rotura se genera casi en su totalidad en el riego de adherencia, con la Dotación II existe una mayor proporción de la rotura generada parte en el riego y parte en la superficie de la base y con la Dotación III nuevamente una rotura producida mayoritariamente en el riego. A partir de los resultados promedios, se observa que la tensión de corte máxima S_{max} de 0,262 MPa y el desplazamiento al corte en la rotura TD de 5,4 mm se dan con la Dotación II, que surge de la aplicación del CIR de acuerdo al modelo desarrollado. Por lo expresado, estos resultados guardan relación con los logrados en las experiencias en laboratorio. Resulta pertinente pensar por ello que la experiencia realizada valida los CIR obtenidos. Además, habría en el estudio dos series de probetas que se pueden individualizar y comparar, pues responden a una misma tipología de materiales. Por un lado, están aquellas confeccionadas con un testigo de una capa bituminosa fresada de una obra existente como base y un revestimiento de carpeta bituminosa nueva moldeado en laboratorio. Por el otro, se encuentran las que poseen la capa de base (con fresado simulado por aserrado) y de revestimiento nuevas moldeadas en laboratorio. Al analizar las resistencias al corte de ambas series, se ve que las primeras se encuentran por debajo de las segundas. Esto se condice por lo expresado por Berenguer et al. (2017), en cuanto a que los testigos dobles extraídos en campo dan generalmente menores resistencias al corte que las probetas dobles moldeadas en laboratorio^(xxv).

2.2. Análisis de un caso en una obra en la provincia de Lérida (España)

En la provincia de Lérida, situada en la comunidad autónoma de Cataluña, es habitual la conformación de capas viales bituminosas que emplean áridos calizos y bitumen de baja penetración. A raíz de la existencia de un proyecto de investigación conjunto con la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), relacionado con la temática que aborda el presente trabajo, se plantea la realización de una experiencia que haga uso de estos materiales, para observar la posible extrapolación de resultados en tal sentido.

Las mezclas bituminosas que constituyen el sistema a ser analizado, tanto en la capa de base fresada como en la de revestimiento, son del tipo de Concreto Asfáltico Semidenso de Tamaño Máximo 16 mm (AC16S), de acuerdo al Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) de España^(xxvi). Este último establece que esta mezcla bituminosa debe responder a ciertos límites granulométricos, presentar un contenido mínimo de bitumen de 4,5% y estar colocada en espesores de entre 4 cm y 5 cm. También el PG-3 estipula las características a ser cumplidas por el riego de adherencia a ser utilizado, del tipo C60B3ADH. La formulación de la mezcla bituminosa se logra mediante un agregado grueso 8:16 (participando en un 28,58%), un agregado intermedio 4:8 (en un 23,81%) un agregado fino 0:4 (en un 42,86%) y un bitumen 35/50 (en un 4,75%). La emulsión bituminosa empleada para el riego de adherencia es del tipo C60B4ADH, la cual presenta una velocidad de rotura menor a la C60B3ADH, con un residuo de bitumen del 60% y una penetración del asfalto residual (en 0,1 mm) de 180-200. A partir de estos materiales y dosificación, se moldean probetas dobles con interfase lisa correspondientes a diferentes dotaciones de residuo de bitumen del riego de adherencia. Dado lo que se estila en España, se emplean las dotaciones expresadas en unidad de peso por unidad de superficie. De todos modos, como el problema a resolver es de tipo volumétrico, si se desea analizar las dotaciones en l/m^2 , no hace falta más que afectarlas por la densidad del residuo de bitumen. Para este moldeado se utiliza el sistema de compactación de martillo percutor, montado sobre un pie de compactación, que se hace actuar sobre la capa a compactarse durante 2 minutos.

Las probetas así moldeadas se analizan en su resistencia al corte mediante el Ensayo LCB, adaptado a la potencial existencia del fresado en la interfase. Para ello se realiza el desmolde parcial de la probeta doble, hasta lograr una posición de ésta que permita el desarrollo de una luz de 15 mm a ambos lados de la interfase; es decir, entre la interfase y el molde y entre la interfase y el apoyo. Luego, se llevan durante al menos 4 horas al acondicionamiento a 20°C en cámara. Las probetas se ensayan finalmente mediante la metodología especificada. A partir de los resultados obtenidos, se establece para esta sección del estudio un contenido óptimo de riego de adherencia para la interfase lisa de 400 g/m^2 con un S_{max} de 0,923 MPa y un TD de 1,17 mm. De todos modos, se observa también que



Figura 10. Tareas en el tramo en estudio. Fuente: Benito Arnó e Hijos, SAU.

el rango de ese contenido óptimo resulta notoriamente más amplio que el registrado mediante la sistemática de ensayo empleada con materiales locales en Argentina. Esto puede deberse a dos factores importantes, relacionados con la reología del ligante bituminoso implicado. Uno de ellos es que la penetración del bitumen residual del riego de adherencia utilizado es elevada, lo cual implica un importante componente viscoso en su comportamiento a la temperatura de 20°C de ensayo. El otro aspecto es que la velocidad de ensayo de 2,5 mm/min es el doble que la de 1,27 mm/min empleada en las experiencias en Argentina. En relación a esto último, cabe recordar que, a mayor velocidad de ensayo, se obtienen resultados mayores de resistencia al corte y menores de desplazamiento, lo cual no facilita la visualización de las diferencias relativas entre los diversos contenidos de dotación de riego de adherencia empleados.

A continuación, se procede a trasladar este contenido óptimo de riego de adherencia para la interfase lisa a una experiencia de obra análoga a la efectuada en el punto anterior. Para eso, se tramita el acceso a un tramo de prueba de fresado superficial de una capa bituminosa realizada con los materiales en estudio. Dicho tramo de prueba, ubicado, como ya se ha expresado, en la provincia de Lérida, se encuentra en las instalaciones del obrador que la empresa Benito Arnó e Hijos, SAU posee en el municipio de Alfarrás. El fresado se realiza en julio de 2018. En la Figura 10 se puede observar, a la izquierda, la realización de las mediciones con parche de arena de la textura del tramo, y a la derecha, la extracción de los testigos a emplearse en la continuidad del estudio. Los testigos extraídos son acondicionados en laboratorio mediante su aserrado en un espesor de 5 cm.

Las dotaciones son aplicadas a los testigos. A continuación, se moldean las probetas dobles, las cuales, una vez que se han enfriado, son desmoldadas parcialmente para lograr la ubicación de la interfase en el punto intermedio de los 30 mm dejados de luz entre el borde del molde y el apoyo. Entonces, se procede al ensayo de las probetas, obteniéndose curvas de esfuerzo al corte *versus* desplazamiento en la interfase, en las que se ve cómo la pérdida de carga se da de manera más lenta que en los ensayos efectuados con el procedimiento desarrollado para el estudio. Esto deja en evidencia la existencia de ciertas diferencias en la aplicación de ambas metodologías de análisis.

Mediante los ensayos, se obtienen los resultados óptimos de aproximadamente 0,850 MPa de S_{max} y 1,8 mm de TD, ubicados entre la Dotación I y la Dotación II, más cercana a la primera. De todos modos, se observa que estos valores logrados solo deben ser tomados de manera indicativa, dado lo limitado de las muestras analizadas; razón por la cual se deduce la necesidad de profundizar los conocimientos en tal sentido en futuros estudios asociados.

3. Conclusiones

Los resultados obtenidos mediante el presente estudio permiten establecer que los Coeficientes de Incremento de Riego (CIR) óptimos se obtienen al incrementar la dotación 1/3 del incremento de superficie en la interfase, pudiéndonos utilizar para establecer la Dotación de Riego Incrementada (DRI) a partir de una Dotación de Riego para la interfase lisa (DR), mediante $DRI = CIR \cdot DR$. La fórmula que permite establecer el CIR en función del Diámetro de Parche de Arena (DPA), resultante para un volumen de arena de 40 cm³, es:

$$CIR = 2,014 \cdot DPA^{0,184}$$

De la aplicación preliminar de análisis al corte mediante solicitaciones dinámicas de carga, se puede deducir que existen indicios que permitirían ratificar los resultados obtenidos mediante la aplicación estática de la carga, pero que, en regiones en las cuales las temperaturas predominantes disten significativamente de los 20°C, sería adecuado conducir esos análisis a otra temperatura de referencia, pues es posible que se obtengan resultados diferentes en cuanto a la dotación óptima del riego de adherencia.

En aplicaciones sobre materiales notoriamente diferentes a los empleados en las experiencias y/o con metodologías de ensayo que disten de la desarrollada, es posible obtener resultados no totalmente coincidentes con los de laboratorio, razón por la cual se requiere conducir estudios adicionales en tal sentido.

Referencias bibliográficas

- I. MARTÍNEZ-ECHEVARRÍA, M.J., "Estudio de compactación en laboratorio para mezclas recicladas en frío con emulsión bituminosa", Tesis Doctoral, Universidad de Granada, España, 2012.
- II. NCHRP, "Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures", National Research Board, 1-37A team, EEUU, 2004.
- III. MILLER, J. & BELLINGER, W., "Distress identification manual for the long-term pavement performance program", fourth revised edition, report n° FHWA-RD-03-031, Washington DC, EEUU, 2003.

- IV. WIRTGEN, "El mundo de las fresadoras en frío de Wirtgen", Wirtgen Group Company, Alemania, 2015.
- V. BUSSARD, M., "Milling & Micro Milling", P.R. Systems Inc., EE UU, 2014.
- VI. RIVERA, J., BIANCHETTO, H. & QUEIZAN, A., "Modelo para corrección de dosaje de riegos de liga sobre superficies fresadas en refuerzos asfálticos", Revista *Carreteras*, N° 218, pp 46-54, mar-abr de 2018.
- VII. ESPINOZA, M., "Capas de refuerzo con hormigón adheridas como alternativa para la rehabilitación de pavimentos asfálticos", Revista *Infraestructura Vial* (ISSN 1409-4045), Universidad de Costa Rica, volumen 17, número 30, diciembre, Costa Rica, 2015.
- VIII. MONTETRUSQUE, M., BERNUCCI, L., LEITE, F. & TEORO CARMO, C.A., "Avaliação da adherencia de geogrelhas entre camadas asfálticas", Memorias XVIII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, ISBN 978-950-630-031-9, Bariloche, Argentina, 2015.
- IX. RICCI, L., "Evaluación de adherencia entre capas asfálticas con intercapa de geosintético", Tesis de Maestría en Ingeniería en Transporte – Orientación Vial, Universidad de Buenos Aires, Argentina, 2011.
- X. DUEÑAS, A. & RECASENS, R., "Emulsiones de adherencia resistentes al tráfico de obra", Revista *Carreteras*, no 128, pp 27-36, 2003.
- XI. DNV, "Pliego de especificaciones técnicas generales para concretos asfálticos en caliente y semicaliente del tipo densos", Dirección Nacional de Vialidad, Argentina, 2017. [Consultado en julio de 2017 en: http://www.vialidad.gov.ar/sites/default/files/PETG_1.pdf]
- XII. THE ASPHALT CONTRACTOR, "How Micromilling is Saving States Money on Asphalt Road Repairs", The Asphalt Contractor Magazine, 30 de noviembre de 2011. [Consultado 12 de diciembre de 2016 en: <http://www.forconstructionpros.com/article/10456001/how-micromilling-is-saving-states-money-on-asphalt-road-repairs>]
- XIII. EICAM, "Curso de actualización de diseño estructural de caminos, método AASHTO93", Universidad Nacional de San Juan, Argentina, 1998.
- XIV. UZAN, J., LIVNEH, M. & ESHED, Y., "Investigation of adhesion properties between asphalt concrete layers", Proc. Assoc. Asphalt Paving Technologists, St. Paul, Minn, 47, 495-521, EEUU, 1978.
- XV. ROMANOSCHI, S.A., "Characterization of Pavement Layer Interfaces", Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College, EEUU, 1999.
- XVI. BROWN, S.F. & BRUNTON, J.M., "The influence of bonding between bituminous layers", Highways Transportation, 31(5), 16-17, EEUU, 1984.
- XVII. D'ANDREA, A., TOZZO, C., BOSCHETTO, A. & BOTTINI, L., "Interface roughness parameters and shear strength", Modern Applied Science (ISSN 1913-1844), Canadian Center of Science and Education, vol 7, n 10, Canada, 2013.
- XVIII. TOSTICARELLI, J.R., "Ensayos para evaluar la adherencia entre capas asfálticas", Memorias de la XXXII Reunión del Asfalto en Tafí del Valle (Tucumán), Comisión Permanente del Asfalto, Argentina, 2002.
- XIX. BOTASSO, G., RICCI, L., FENSEL, E., DELBONO, L. & RIVERA, J., "Sistema de membrana antifisuras con geocompuesto, una metodología de evaluación", Revista *Carreteras*, no. 175, pp 50-60, 2011.
- XX. YAACOB, H. & HAININ, M.R. et al., "Information for the malaysian asphalt industry towards better pavement interlayer bonding", Sains Malaysiana, n 43, vol 3, pp 467-474, Malasia, 2014.
- XXI. IRAM, "Norma IRAM 1850: Agregados. Método de determinación de la profundidad de la macrotextura superficial de un pavimento mediante el círculo de arena", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina, 1997.
- XXII. BELLO, M., "Apuntes de la capacitación sobre predicción y bondad de ajuste", Capacitaciones Software-Shop, Colombia, 2016.
- XXIII. GIOVANON, O. & BUONO, F., "Riego de liga, su importancia estructural y análisis tensional", XXXV Reunión del Asfalto, Comisión Permanente del Asfalto, Rosario, Argentina, 2008.
- XXIV. RIVERA, J. & BOTASSO, G., "Guía de metodologías y procedimientos para uso vial desarrollados en el LEMaC", edUTecNe, Universidad Tecnológica Nacional, ISBN 978-987-4998-27-9, 2° Edición, 2019.
- XXV. BERENQUER, J.M., CALVO, C., MOLINA, J., GOMÁRIZ, R. & PEÑA, J.L., "El ensayo de adherencia de capas de firme según NLT-328/08. Estudio comparativo de los resultados obtenidos con los dispositivos A y B", XIX Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Medellín, Colombia, 2017.
- XXVI. BOE, "Orden FOM/2523/2014 del Ministerio de Fomento", Boletín Oficial del Estado, número 3, sección III, página 584, 3 de enero, España, 2015. ■



acceso
al trabajo
completo

Nuevo método de prueba para determinar el potencial de fractura del ligante asfáltico

New test method to determine the fracture potential of the asphalt binder

Álvaro GUTIÉRREZ MUÑIZ

*Investigador en el Área de Asfaltos, Quimikao, S.A. de C.V.
El Salto, Jalisco, México*

Raymundo BENÍTEZ LÓPEZ

*Superintendente del Grupo de Asfaltos, Quimikao, S.A. de C.V.
El Salto, Jalisco, México*

RESUMEN

En este estudio se propone un nuevo método de prueba para determinar el potencial de fractura del ligante asfáltico utilizando el reómetro de corte dinámico (DSR). Este método de prueba cubre la determinación de la Energía de Fractura (Gf) o la Energía Disipada (GD) del ligante asfáltico obtenidas de la curva Carga-Desplazamiento. Los datos para la elaboración de esta curva se obtienen del reómetro de corte dinámico que realiza una prueba de barrido de amplitud aumentando ésta linealmente a una temperatura intermedia y frecuencia constante. El método también incluye procedimientos para calcular otros parámetros relevantes derivados de la curva Carga-Desplazamiento, tales como la pendiente (m) posterior al pico de carga máxima; estos parámetros se pueden usar para desarrollar un Índice de Flexibilidad (IF) o un Índice de Tenacidad (IT) para predecir la resistencia al agrietamiento y la fisuración del ligante asfáltico.

PALABRAS CLAVE: Energía de fractura, Índice de Tenacidad, Índice de Flexibilidad.

ABSTRACT

In this study a new test method is proposed to determine the fracture potential of the asphalt binder using the dynamic shear rheometer (DSR). This test method covers the determination of the Fracture Energy (Gf) or the Dissipated Energy (GD) of the asphalt binder obtained from the Force-Displacement curve. The data for the elaboration of this curve are obtained from the dynamic cut-off rheometer that performs an amplitude sweep test increasing this linearly at an intermediate temperature and constant frequency. The method also includes procedures to calculate other relevant parameters derived from the Force-Displacement curve, such as the slope (m) after the peak of maximum force, these parameters can be used to develop a flexibility index (IF) or a toughness index (IT) to predict the crack resistance of the asphalt binder.

KEY WORDS: Fracture Energy, Toughness Index, Flexibility Index.



Introducción

Desde finales de la década de 1990, la durabilidad y el agrietamiento del pavimento se han convertido en la principal preocupación en los pavimentos asfálticos. Antes de que surgiera en los Estados Unidos de Norteamérica el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (SHRP), la deformación permanente era la principal preocupación respecto a estos pavimentos y, por ello, este programa se enfocó en solucionarla mediante las mejoras en la calidad del agregado, en el diseño de la mezcla y en el ligante asfáltico con la adición de polímeros; con estas mejoras prácticamente se ha logrado reducir la deformación permanente, pero el problema de fisuración por fatiga y agrietamiento no se ha solucionado, por lo que ahora es el momento de emplear todos los recursos para incrementar la durabilidad de los pavimentos asfálticos⁽ⁱ⁾; de ahí la motivación de proponer este nuevo método para determinar el potencial de fractura del ligante asfáltico. Se suponía que las especificaciones del ligante asfáltico creadas en el programa SHRP, referidas como SUPERPAVE, establecidas en la norma AASHTO M 320-19, abordaban los problemas de fisuración por fatiga y de agrietamiento transversal a baja temperatura, creando para el control de la fisuración por fatiga el parámetro de $[G \cdot \sin \delta]$, limitándolo a 5000KPa como máximo a una temperatura intermedia utilizando el reómetro de corte dinámico; y para el control de agrietamiento transversal a baja temperatura crearon el parámetro de la medición de la pendiente, la curva de Rigidez vs Tiempo “m”, limitada al valor absoluto de 0,300 como mínimo en conjunto con el valor de la Rigidez “S” al valor de 300MPa como máximo, empleando el reómetro de viga de flexión (BBR). Los parámetros de control del BBR parecen estar haciendo un buen trabajo al abordar el agrietamiento transversal a baja temperatura, pero no así con el reómetro de corte dinámico “DSR”, ya que el parámetro $[G \cdot \sin \delta]$ no ha funcionado, por lo que en muchos países se está realizando un extenso estudio para tratar de reemplazarlo⁽ⁱⁱ⁾ surgiendo la oportunidad de desarrollar nuevos métodos con sus respectivos parámetros de control, tal como el método LAS (*Linear Amplitude Sweep Test*), descrito en AASHTO TP 101-12 (2018), que realiza un barrido de frecuencia y después un barrido de deformación lineal para obtener una ley de fatiga que expresa un modelo potencial donde el número de ciclos a la falla está en función de la deformación aplicada, muy similar a la ley de fatiga obtenida por los ensayos de mezclas asfálticas que utilizan cargas dinámicas con micro deformaciones y frecuencias constantes durante mucho tiempo. Por lo que respecta a las mezclas asfálticas, tanto en América como en Europa el diseño de estas prestó especial atención a evaluar el control de deformaciones plásticas mediante diversos ensayos de pista, dejando en un segundo plano el comportamiento a la fisuración de las mezclas^(iii, iv), siendo éste último uno de los principales tipos de fallo de los pavimentos asfálticos. Últimamente, los investigadores se han esforzado y han desarrollado numerosos ensayos para evaluar este comportamiento a la fisuración, de tal forma que podríamos agruparlos en dos grandes grupos y estos serían los que utilizan una carga monotónica (Semi-Circular Bend ILLINOIS “SCB” test AASHTO TP124-18, Ensayo FÉNIX, Indirect Tension “IDT” AASHTO T322, Disk-Shaped Compact Tension “DCT” test ASTM D7313-13) y los que utilizan una carga

cíclica (Bending Beam Fatigue “BBF” test AASHTO T321, Texas Overlay Test “OT” Tex 248-F, Ensayo de Fatiga de Viga a Flexión en tres puntos UNE-EN 12697-24:2006)^(v, vi). Los ensayos bajo carga monotónica proporcionan los datos necesarios para crear una gráfica que describe una curva de Fuerza o Carga vs Desplazamiento donde la zona posterior a la fuerza máxima es de gran importancia, porque es ahí donde comienza el proceso de fisuración terminando en la fractura. Los ensayos bajo carga cíclica proporcionan una ley de fatiga basada en un modelo potencial donde el número de ciclos a la falla está en función de la deformación aplicada, utilizando una frecuencia y temperatura constantes. De todos los métodos anteriores, los más prácticos y económicos son el SCB ILLINOIS AASHTO TP 124-18 y el Ensayo FÉNIX^(vii). El método SCB ILLINOIS AASHTO TP 124-18 consiste en determinar el esfuerzo necesario para fisurar una probeta semicilíndrica de mezcla asfáltica aplicando un esfuerzo de tensión indirecta para producir la fractura de esta; la carga es monotónica y se aplica a una velocidad de deformación constante y a una temperatura de 25°C, esta carga se gráfica en función del desplazamiento de la misma y de ahí se obtienen diversos parámetros tales como Energía de Fractura (G_f), pendiente posterior al pico (m) e Índice de Flexibilidad (F_I). Estos parámetros nos permiten describir la resistencia a la fisuración y fractura de la mezcla asfáltica. La metodología del ensayo FÉNIX consiste en someter media probeta cortada por un plano diametral a un esfuerzo de tracción directa para provocar su fractura simulando la propagación de una fisura en una capa de mezcla asfáltica y mediante los resultados obtenidos de la curva Carga-Desplazamiento, se obtienen los parámetros tales como la energía disipada (G_D), Índice de Tenacidad (IT), Índice de Rigidez al Corte (IRT) y una Tensión máxima ($T_{Máx}$); estos parámetros nos permiten describir la resistencia a la fisuración y fractura de la mezcla asfáltica^(viii, ix).

Descripción de este nuevo método de prueba para evaluar el potencial de fractura del ligante asfáltico

Dado que los métodos SCB ILLINOIS AASHTO TP 124-18 y FÉNIX son los más prácticos y económicos para determinar el potencial de fractura de una mezcla asfáltica, nos propusimos crear un método para determinar el potencial de fractura del ligante asfáltico basado en los mismos parámetros de control que utilizan estos métodos SCB y FÉNIX, es decir, en este nuevo método aplicamos un esfuerzo cortante en forma cíclica a una muestra de ligante asfáltico, deformándola a una velocidad y temperatura constante. Esta deformación es convertida a desplazamiento para obtener una curva de Carga vs Desplazamiento o también llamada Fuerza-Desplazamiento, similar a la obtenida con los métodos SCB y FÉNIX, por lo que a partir de la misma se obtienen los mismos parámetros de control de la fisuración con los cuales el diseñador de la mezcla asfáltica obtendrá el mejor ligante asfáltico y con el mismo podrá jugar con todas las demás variables de diseño para obtener la mejor mezcla asfáltica resistente a la fisuración por fatiga y a la deformación permanente. Este nuevo método de prueba cubre la determinación de la Energía de Fractura (G_f) o la Energía Disipada (G_D) del ligante

asfáltico, derivadas de la curva de Carga-Desplazamiento. Los datos de esta curva se obtienen del reómetro de corte dinámico que realiza una prueba de barrido de amplitud (deformación), empleando incrementos de carga que aumentan linealmente la deformación a una temperatura intermedia y frecuencia constante. La temperatura, al igual que la frecuencia, son constantes durante la prueba, pero se pueden cambiar en función de la cantidad de deformación a la cual se desea obtener la fractura, por ejemplo, a una temperatura de 25°C y frecuencias mayores de 20Hz, la fractura ocurre a bajos porcentajes de deformación (ver Figura 3), en cambio a una temperatura de 25°C y frecuencias iguales o menores a 15Hz, la fractura ocurre después del 100% de deformación, permitiéndonos seguir deformando el ligante asfáltico después de aplicar la carga máxima y obteniendo una completa curva de Carga-Desplazamiento (ver Figura 3), por lo que se sugieren estos últimos parámetros para realizar este ensayo, específicamente 25°C y 10Hz. El ligante asfáltico utilizado en la prueba puede ser el original, después del ensayo RTFO (AASHTO T 240), después del ensayo PAV (AASHTO R28), después de 2 o más veces el ensayo PAV o cualquier condición de oxidación del ligante asfáltico. Este nuevo método también incluye dos procedimientos para calcular los parámetros relevantes derivados de la curva "Carga-Desplazamiento" y son:

1. Procedimiento ILLINOIS

Este procedimiento está basado en los mismos parámetros que utiliza el método de prueba AASHTO TP 124-18 (Semi-Circular Bending Test "SCB")^(VIII) y, por lo tanto, de la curva Carga-Desplazamiento se

obtiene el valor absoluto de la pendiente [m] de la curva en la zona posterior a la fuerza máxima aplicada y con este valor en conjunto con la Energía de Fractura (G_f) se calcula el Índice de Flexibilidad (IF), indicativo del potencial de resistencia de fractura del ligante. Cuanto más alto sea el IF, mayor será su potencial de resistencia a la fractura. El Índice de Flexibilidad se calcula dividiendo la Energía de Fractura entre el valor absoluto de la pendiente de la curva Carga-Desplazamiento en la zona posterior a la fuerza máxima, por lo que para que el ligante tenga un alto Índice de Flexibilidad, será necesario que tenga una gran cantidad de energía de fractura, pero que también tenga la capacidad de deformarse en la zona posterior a la fuerza máxima de la curva Carga-Desplazamiento, esto es, que el valor negativo de la pendiente sea lo más cercano a 0, o en otras palabras, que la pendiente presente el mayor ángulo posible. La interpretación física sería que un ligante asfáltico con un alto Índice de Flexibilidad es un ligante dúctil.

2. Procedimiento FÉNIX

Este procedimiento está basado en los mismos parámetros que utiliza el ensayo FÉNIX^(II, IV) y, por lo tanto, de la curva Carga-Desplazamiento se obtienen parámetros tales como la Energía Disipada (G_d), el Índice de Rigidez al Corte (IRT), la Tensión Máxima ($T_{máx}$) y el Índice de Tenacidad (IT), indicativo del potencial de resistencia de fractura del ligante; cuanto más alto sea este valor mayor será su potencial de resistencia a la fractura. En este procedimiento se incluye un nuevo parámetro denominado Índice de Tenacidad Plástico (ITP).

Para que el ligante tenga un alto Índice de Flexibilidad será necesario que tenga una gran cantidad de energía de fractura, así como la capacidad de deformarse en la zona posterior a la fuerza máxima de la curva Carga-Desplazamiento.



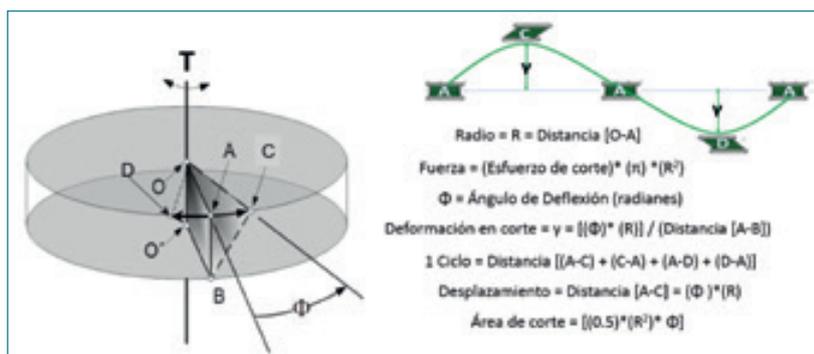


Figura 1. Movimiento del plato superior durante la prueba del método propuesto.

igual al desplazamiento angular $[\Phi]$ multiplicado por el radio $[O-A]^{(vi)}$ entre la distancia entre platos $[A-B]^{(vi)}$. Este desplazamiento (expresado en milímetros) se va incrementando a una velocidad constante, requiriendo una determinada fuerza (KN) y, al graficar los datos de la fuerza o carga vs el desplazamiento, se obtiene una curva que describe una fuerza máxima a una determinada deformación expresada en desplazamiento.

La prueba puede hacerse a cualquier condición de oxidación del asfalto y a cualquier temperatura, pero esta, al igual que la frecuencia, deben de permanecer constantes durante todo el ensayo.

Fundamentos teóricos de la prueba del método propuesto

La prueba requiere de un reómetro de corte dinámico (DSR) y se lleva a cabo colocando una pequeña cantidad de ligante asfáltico entre dos platos metálicos de 8 mm de diámetro de los cuales el inferior permanece fijo y el superior gira repetidamente en forma oscilatoria, de tal forma que un solo ciclo de carga ocurre cuando el plato superior gira en dirección contraria a las manecillas del reloj desde su posición cero (A) a la posición (C), después gira en sentido de las manecillas del reloj hasta la posición (D) y, por último, gira en sentido contrario a las manecillas del reloj hasta la posición (A)^(vi, vii), tal como muestra la Figura 1.

La prueba comienza aplicando un esfuerzo de corte (*Shear Stress*) necesario para deformar la muestra del ligante asfáltico un 0,1% (*Initial Strain* 0,1%) y después de 10 ciclos alcanza una deformación del 0,2% y así sucesivamente hasta completar el 100% de deformación, por lo que la prueba realiza 1010 mediciones (1.010 puntos) con 10.100 ciclos totales. La rapidez con la que el equipo realiza los ciclos dependerá de la frecuencia que utilizemos en la prueba, por ejemplo, si la prueba se realiza a una frecuencia de 10Hz (10 ciclos por segundo), el tiempo que dura el reómetro deformando el ligante entre 0,1% y 0,2% será de un segundo, por lo que el tiempo total de la prueba será de 1.010 segundos; si cambiamos la frecuencia a 20Hz con 10.100 ciclos totales, entonces la prueba durará 505 segundos (la mitad del tiempo que con 10Hz), y si utilizamos 5Hz con 10.100 ciclos totales, entonces la prueba durará 2.020 segundos (el doble de tiempo que con 10Hz). La deformación (*Strain*) que sufre el ligante será igual a la distancia $[A-C]$ entre la distancia que existe entre los platos paralelos $[A-B]^{(vi)}$ y si esta distancia es de 1.000 mm (recomendación) entonces la deformación será igual al desplazamiento (este es

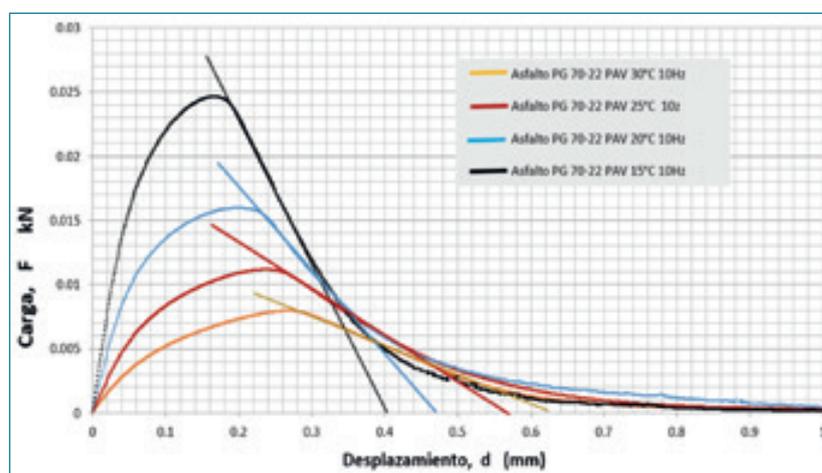


Figura 2. Variación de la pendiente en la zona post-pico conforme cambia la temperatura para un ligante asfáltico PG 70-22 después de PAV, utilizando una frecuencia de 10Hz.

Utilizando los parámetros del método SCB ILLINOIS AASHTO TP 124-18			
Temperatura de prueba (°C)	Energía de fractura Gf (Joules/m²)	Índice de flexibilidad (IF)	
15	3.535,12	3,85	
20	2.931,19	5,79	
25	2.146,79	6,45	
30	1.536,55	6,30	

Utilizando los parámetros del Ensayo FÉNIX			
Temperatura de prueba (°C)	Energía disipada GD (Joules/m²)	Energía disipada en zona post-pico GD (Joules/m²)	Índice de Tenacidad IT ((Joules/m²)*mm)
15	3.535,12	2.454,21	417,22
20	2.931,19	2.036,27	427,72
25	2.146,79	1.395,15	313,91
30	1.536,55	918,71	200,28

Tabla 1. Parámetros de control obtenidos de las curvas Carga vs Desplazamiento de la Figura 2.

La prueba puede hacerse a cualquier condición de frecuencia pero a temperatura constante, observando que, a frecuencias altas, el ligante se comporta como un sólido viscoelástico, y a bajas frecuencias como un líquido viscoelástico.

En la gráfica de la Figura 2 podemos observar las curvas de Carga vs Desplazamiento de un ligante asfáltico grado PG 70-22 después de la condición de oxidación PAV (AASHTO R28) a diferentes temperaturas y una frecuencia de 10Hz; claramente se puede observar cómo el ángulo de la pendiente de la curva en la zona post-pico va disminuyendo conforme disminuye la temperatura; este mismo patrón de conducta lo muestran todos los ligantes y también es observado utilizando mezclas asfálticas con los métodos SCB y FÉNIX, solo que con diferentes valores de fuerza y desplazamiento dada la diferencia de los tamaños y composiciones de las muestras que se utilizan en cada ensayo^(II,IV).

De las curvas Carga vs Desplazamiento de la Figura 2, se obtienen los parámetros que utiliza el método SCB ILLINOIS, tales como la Energía de Fractura " G_f " y el Índice de Flexibilidad "IF" del ligante asfáltico PG 70-22, y los parámetros que utiliza el método FÉNIX, tales como la Energía Disipada " G_D " en toda la curva y en la zona post-pico, así como el Índice de Tenacidad "IT" de este ligante asfáltico (ver Tabla 1).

La prueba puede hacerse a cualquier condición de frecuencia pero a temperatura constante, observando que a frecuencias altas el

ligante se comporta como un sólido viscoelástico y a bajas frecuencias como un líquido viscoelástico. Esto claramente se manifiesta en las curvas Carga o Fuerza vs Desplazamiento de la Figura 3, donde, utilizando un ligante asfáltico grado PG 70-28 después de RTFO y a 25°C, observamos que el ángulo de la pendiente de la curva en la zona post-pico va disminuyendo conforme aumenta la frecuencia; este mismo patrón de conducta lo muestran todos los ligantes y también se observa con las mezclas asfálticas utilizando los métodos SCB y FÉNIX, con la diferencia de los altos valores de fuerza y desplazamiento debido a las composiciones y tamaños de las muestras que se utilizan en cada ensayo.

Repetibilidad de los parámetros IF e IT obtenidos con este nuevo método en una muestra de ligante

Con el objetivo de evaluar la repetibilidad de los parámetros Índice de Flexibilidad "IF" e Índice de Tenacidad "IT" del nuevo método de prueba propuesto en este estudio, se muestran las curvas de Carga-Desplazamiento de cuatro muestras de un ligante asfáltico grado PG 76-22 después de RTFO a 25°C y 10Hz, obteniendo el Índice de Flexibilidad con el procedimiento ILLINOIS y el Índice de Tenacidad con el procedimiento FÉNIX de cada una de estas muestras, determinando la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación. Estos resultados se muestran en la Tabla 2. El coeficiente de variación es la variación ambicionada de un conjunto de datos respecto de su media aritmética y es igual a la desviación estándar entre la media aritmética por cien.

Resultados de la evaluación del potencial de fractura de diversos ligantes asfálticos y mezclas asfálticas utilizando este nuevo método de prueba

Evaluación 1. En esta evaluación se utilizó un ligante asfáltico PG 70-28 y un ligante PG 76-22 y, después de ser oxidados en el horno de la película delgada conforme al procedimiento AASHTO T 240, fueron sometidos al ensayo propuesto en estudio a una temperatura de

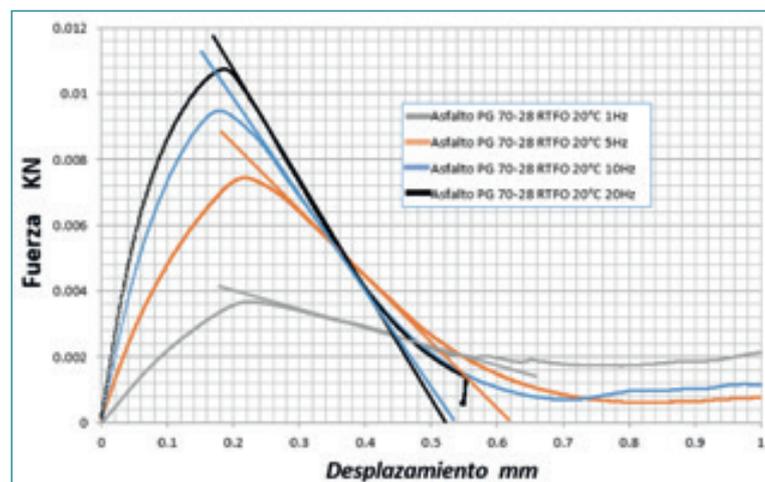


Figura 3. Variación de la pendiente conforme cambia la frecuencia para un ligante asfáltico PG 70-28 después de RTFO, utilizando una temperatura de 25°C.

	Índice de Flexibilidad	Índice de Tenacidad (Joules/m ²)*mm
Muestra 1	6,47	639,48
Muestra 2	6,43	620,28
Muestra 3	6,29	633,64
Muestra 4	6,20	609,51
Media	6,35	625,73
Desviación estándar	0.13	13,47
Coefficiente de variación	1,97	2,15

Tabla 2. Coeficiente de variación entre cuatro muestras de un ligante asfáltico PG 76-22 después de RTFO a 25°C y 10Hz utilizando los procedimientos ILLINOIS y FÉNIX.

25°C y una frecuencia de 10Hz, obteniendo sus respectivas curvas de Carga vs Desplazamiento mostradas en la gráfica de la Figura 4(a). Con estos mismos ligantes asfálticos se fabricaron mezclas asfálticas para determinar los parámetros requeridos por el método SCB ILLINOIS AASHTO TP 124-18; sus respectivas curvas de Carga vs Desplazamiento son mostradas en la gráfica de la Figura 4(b).

Al comparar las gráficas de la Figura 4 nos damos cuenta de que las curvas Carga-Desplazamiento siguen un mismo patrón de conducta, es decir, tanto el ligante asfáltico grado PG 76-22 como su mezcla asfáltica presentaron mayor área bajo la curva,

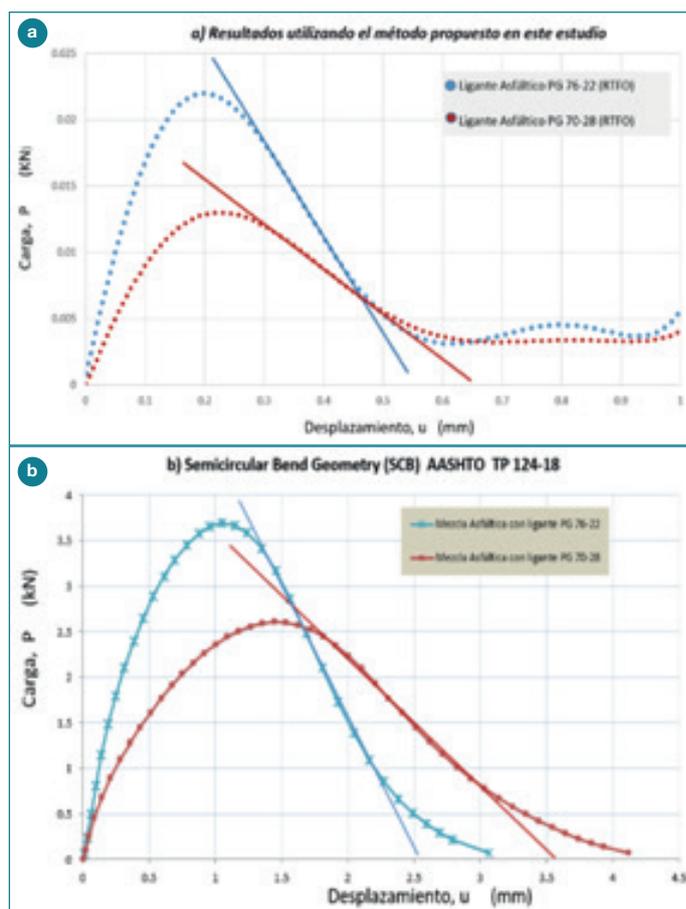


Figura 4. Curvas Fuerza vs Desplazamiento del ligante asfáltico (a) y de la mezcla asfáltica (b).

	Parámetros utilizando este nuevo método de prueba con el procedimiento ILLINOIS (Ligante asfáltico)		Parámetros utilizando el método de prueba de mezclas asfálticas AASHTO TP 124-18 (Mezcla Asfáltica)	
	76-22	70-28	76-22	70-28
Grado PG del ligante utilizado	76-22	70-28	76-22	70-28
Grado de oxidación del ligante asfáltico en la prueba	Después de RTFO AASHTO T 240	Después de RTFO AASHTO T 240	No es conocido. La mezcla se dejó envejecer en el horno por 2 horas a 150°C	No es conocido. La mezcla se dejó envejecer en el horno por 2 horas a 150°C
Desplazamiento a la carga máxima "umáx" (mm)	0,200	0,230	1,05	1,44
Relación uMáx	(0,200 / 0,230) = 0,87		(1,05/1,44) = 0,73	
Carga Máxima, Pmáx (kN)	0,023	0,013	3,7	2,6
Relación Carga Máxima Pmáx	(0,023 / 0,013) = 1,77		(3,7/2,6) = 1,42	
Trabajo de Fractura "Wf" (Joules)	0,00935	0,00645	6,0315	5,9366
Relación Wf	(0,00935 / 0,00645) = 1,45		(6,0315/5,9366) = 1,02	
Área de Fractura (mm ²)	2	2	2.998,8	3.083,39
Energía de Fractura Gf (Joules/m ²)	4.675	3.225	2.011,31	925,03
Relación Gf	(4.675 / 3.225) = 1,45		(2.011,31/1.925,03) = 1,05	
Índice de Flexibilidad (IF)	6,31	9,06	6,27	12,42
Relación IF	(6,31 / 9,06) = 0,70		(6,27/12,42) = 0,51	
Pendiente (m)	-0,0740363	-0,035593725	-3,21	-1,55
Relación (m)	(-0,0740363 / -0,035593725) = 2,08		(-3,21/-1,55) = 2,07	

Tabla 3. Parámetros de este nuevo método propuesto utilizando el procedimiento ILLINOIS y parámetros utilizando el método de mezcla AASHTO TP 124-18.

mayor carga, menor desplazamiento a la carga máxima y menor pendiente. Para poder establecer un patrón comparativo, se elaboró la Tabla 3, donde se manifiestan todos los parámetros de este nuevo método propuesto utilizando el procedimiento ILLINOIS y se comparan con los parámetros de la mezcla según el método AASHTO TP124-18.

Evaluación 2. En esta evaluación se utilizó un ligante asfáltico PG 70-28 y un ligante PG 76-22; después de ser oxidados en el horno de la película delgada conforme al procedimiento AASHTO T 240, fueron sometidos al ensayo propuesto en el estudio a una temperatura de 25°C y una frecuencia de 10Hz, obteniendo sus respectivas curvas de Carga-Desplazamiento mostradas en la gráfica de la Figura 4(a). Con estos mismos ligantes asfálticos se fabricaron mezclas asfálticas siguiendo el método SCB AASHTO TP124-18 (porque no contamos con el equipo FÉNIX), pero utilizando los parámetros requeridos por el Ensayo FÉNIX; sus respectivas

curvas de Carga-Desplazamiento son mostradas en la gráfica de la Figura 4(b) y son las mismas que en la evaluación 1. Al comparar las gráficas de la Figura 4 nos damos cuenta de que las curvas Carga-Desplazamiento siguen un mismo patrón de conducta, es decir, tanto el ligante asfáltico grado PG 76-22 como su mezcla asfáltica presentaron mayor área bajo la curva, mayor carga y menor desplazamiento a la carga máxima, pero, para poder establecer un patrón comparativo, se elaboró la Tabla 4, donde se manifiestan todos los parámetros de este nuevo método propuesto utilizando el procedimiento FÉNIX y se comparan con los parámetros de la mezcla asfáltica fabricada siguiendo el método SCB AASHTO TP124-18 pero utilizando los parámetros FÉNIX.

Evaluación 3. Con el objetivo de evaluar el potencial de fractura de diversos ligantes asfálticos procedentes de diferentes países pero con el mismo grado PG de 64-22 (este grado PG es el más utilizado) y con un valor de la prueba de penetración a 25°C entre 50 y 80

	Parámetros utilizando este nuevo método de prueba con el procedimiento FÉNIX (Ligante asfáltico)		Mezcla asfáltica siguiendo método de prueba AASHTO TP 124-18 pero con los parámetros FÉNIX	
	76-22	70-28	76-22	70-28
Grado PG del ligante utilizado	76-22	70-28	76-22	70-28
Grado de oxidación del ligante asfáltico en la prueba	Después de RTFO AASHTO T 240	Después de RTFO AASHTO T 240	No es conocido. La mezcla se dejó envejecer en el horno por 2 horas a 150°C	No es conocido. La mezcla se dejó envejecer en el horno por 2 horas a 150°C
Desplazamiento a la carga máxima "dm" (mm)	0,200	0,230	1,02	1,44
Relación dm	$(0,200 / 0,230) = 0,87$		$(1,02/1,44) = 0,73$	
Desplazamiento a 0,5% de $F_{Máx}$ d0.5M (mm)	0,390	0,470	1,90	2,62
Relación d0.5M	$(0,390 / 0,470) = 0,83$		$(1,90 / 2,62) = 0,73$	
Carga máxima, $F_{Máx}$ (kN)	0,023	0,013	3,7	2,6
Relación carga máxima $F_{Máx}$	$(0,023 / 0,013) = 1,77$		$(3,7/2,6) = 1,42$	
Trabajo de fractura "Wf" (Joules)	0,00935	0,00645	6,0315	5,9366
Relación Wf	$(0,00935 / 0,00645) = 1,45$		$(6,0315/5,9366) = 1,02$	
Área de fractura (mm²)	2	2	2.998,8	3.083,39
Energía disipada GD (Joules/m²)	4.675	3.225	2.011,31	1.925,03
Relación GD	$(4.675 / 3.225) = 1,45$		$(2.011,31/1.925,03) = 1,05$	
Energía disipada en zona post-pico GD (Joules/m²)	3.120	2.350	1.141	1.103
Relación GD en zona post-pico	$(3.120 / 2.350) = 1,33$		$(1.141 / 1.103) = 1,04$	
Índice de tenacidad IT ((Joules/m²)*mm)	561,6	611,0	1.004,0	1.290,5
Relación IT	$(5.61,6 - 611,0) = 0,92$		$(1.004,0 - 1.290,5) = 0,78$	
Índice de rigidez ITR ((Joules/m²)* mm)	0,031430	0,018056	1,0	0,5
Relación ITR	$(0,031430 / 0,018056) = 1,74$		$(1,0 / 0,5) = 2,0$	

Tabla 4. Parámetros de los ligantes asfálticos PG 76-22 y PG 70-28 en virtud de este nuevo método propuesto utilizando el procedimiento FÉNIX y parámetros de la mezcla asfáltica con estos ligantes utilizando el método FÉNIX.

País de procedencia del asfalto	México	España	USA	Colombia	Ecuador	Chile	Malasia
Grado PG (AASHTO M320-19)	64-22	64-22	64-22	64-22	64-22	64-22	64-22
Condición de oxidación del ligante asfáltico	RTFO y PAV						
Desplazamiento en la carga máxima "umáx" (mm)	0,143	0,100	0,120	0,130	0,155	0,130	0,105
Carga máxima Pmáx (KN)	0,0235	0,0305	0,0352	0,0175	0,0165	0,0346	0,0188
Trabajo de fractura "Wf" (Joules)	0,0100221	0,006407	0,013429	0,006041	0,006232	0,015648	0,003781
Energía de fractura, Gf (Joules/m ²)	5.011,05	3.203,57	5.314,3	3.020,55	3.116,19	4.823,81	1.890,48
Índice de flexibilidad IF	7,90	1,94	3,84	5,13	5,42	3,36	1,80
Pendiente (m)	-0,06341	-0,16537	-0,13811	-0,058822	-0,05754	-0,14359	-0,10533
Ángulo de la pendiente (°)	176,37	170,61	172,14	176,63	176,71	171,83	173,99
Yield Point (Punto de fluidez) (mm)	0,0617	0,0288	0,0288	0,0466	0,0496	0,0308	0,000

Tabla 5. Resultados de los parámetros de control utilizando el procedimiento ILLINOIS de los diferentes ligantes asfálticos PG 64-22 después de PAV.

décimas de milímetro para todos ellos, utilizamos este nuevo método de prueba con las muestras de los ligantes asfálticos después de ser oxidados por las pruebas RTFO (AAHSTO T-240) y PAV (AAHSTO R28), obteniendo sus respectivas curvas de Carga vs Desplazamiento, determinando los parámetros de control y utilizando el procedimiento ILLINOIS y el procedimiento FÉNIX.

La gráfica de la Figura 5 muestra la curva Carga vs Desplazamiento de todos estos ligantes, aclarando que en la prueba se utilizó este método propuesto con una temperatura de 25°C y una frecuencia de 10Hz.

En la Tabla 5 se muestran los parámetros utilizando el procedimiento ILLINOIS de la curva Carga vs Desplazamiento de todos estos ligantes asfálticos grado PG 64-22, aclarando que

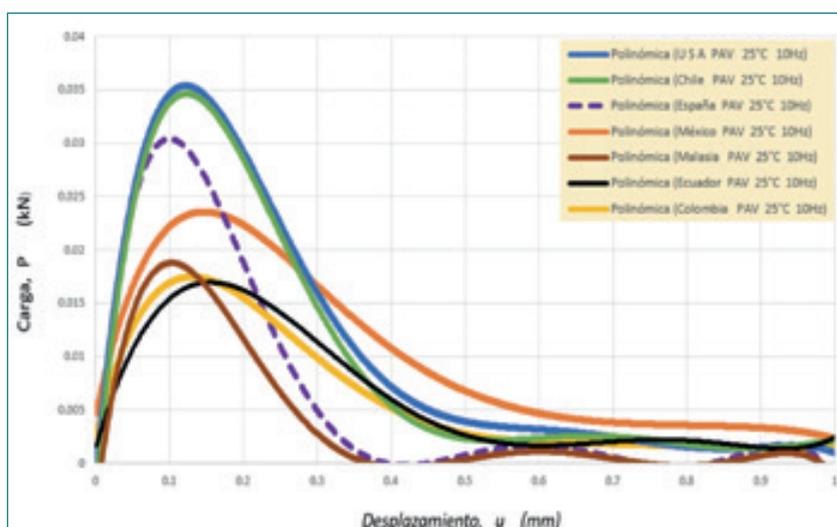


Figura 5.- Gráfica Carga-Desplazamiento de ligantes asfálticos procedentes de diferentes países después de RTFO y PAV con el mismo grado PG de 64-22.

País de procedencia del asfalto	México	España	USA	Colombia	Ecuador	Chile	Malasia
Grado PG (AASHTO M320-19)	64-22	64-22	64-22	64-22	64-22	64-22	64-22
Condición de oxidación del ligante asfáltico	RTFO y PAV						
Desplazamiento en la carga máxima "dm" (mm)	0,143	0,100	0,120	0,130	0,155	0,130	0,105
Desplazamiento a 0,5% de FMáx d0.5M (mm)	0,380	0,210	0,282	0,320	0,350	0,280	0,220
Carga máxima FMáx (KN)	0,0235	0,0305	0,0352	0,0175	0,0165	0,0346	0,0188
Energía disipada GD (Joules/m ²)	5.011,1	3.203,6	5.341,3	3.020,6	3.116,2	4.823,8	1.890,5
Energía disipada en zona post-pico GD (Joules/m ²)	3.743,6	2.174,4	3.850,1	2.180,8	2.170,7	3.256,8	1.253,3
Índice de tenacidad IT ((Joules/m ²)*mm)	887,2	239,2	623,7	414,4	423,3	488,5	144,4
Índice de rigidez ITR (Joules/m ²)* mm	0,04417	0,08472	0,0880	0,03739	0,02989	0,07864	0,05663
ITP (Joules/m ²)* mm	1.191,6	394,0	974,9	596,2	652,1	811,6	276,2

Tabla 6. Resultados de los parámetros de control utilizando el procedimiento FÉNIX de los diferentes ligantes asfálticos PG 64-22 después de PAV.



en la prueba se utilizó este método propuesto con las condiciones físicas de una temperatura de 25°C, una frecuencia de 10Hz y el ligante asfáltico empleado previamente oxidado en las pruebas de RTFO y PAV.

En la Tabla 6 se muestran los parámetros utilizando el método FÉNIX de la curva Carga-Desplazamiento de todos estos ligantes asfálticos grado PG 64-22, aclarando que en la prueba se utilizó este método propuesto con las condiciones físicas de una temperatura de 25°C, una frecuencia de 10Hz y un ligante asfáltico previamente oxidado en las pruebas de RTFO y PAV.

Evaluación 4. Este estudio pretende lograr una nueva forma de seleccionar el mejor ligante asfáltico resistente a la deformación permanente y resistente a la fisuración por fatiga. Para el parámetro del control de la deformación permanente, utilizaremos el valor del Compliance “Jnr” obtenido conforme al método de prueba AASHTO T350 “Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer”, utilizado en la especificación AASHTO M 332-19 “Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test”. Para el control de la fisuración por fatiga utilizaremos el valor del Índice de Flexibilidad o el Índice de Tenacidad, obtenidos conforme al nuevo método de prueba mostrado en este estudio.

La resistencia que ofrece un material a ser deformado la determinamos por medio de su módulo, es decir, un material con un alto módulo será un material rígido, ya que requiere de mucho esfuerzo para deformarse. Cuando utilizamos un esfuerzo cortante, lo con-

trario al Módulo de corte complejo “G* (Pa)” es Compliance “J” (Pa-1), es decir, es la recíproca del módulo. Hablando en términos de las propiedades mecánicas de los materiales, decimos que lo contrario a la rigidez es la flexibilidad, pero en este método de prueba AASHTO T350 el valor de Compliance se calcula utilizando la deformación no recuperada que indica la plasticidad del ligante y es por ello que, para este ensayo, el Compliance se especifica con la letra jota mayúscula y con el subíndice nr (deformación no recuperada) “Jnr”. Como la esencia de este premio “JUAN ANTONIO FERNÁNDEZ DEL CAMPO” es utilizar la lengua española, la traducción al español de Compliance “Jnr” es Plasticidad. Cuanto más bajo sea este valor de “Jnr”, menor plasticidad tendremos. Aplicando estos conceptos al ligante asfáltico, definimos que, a la temperatura máxima del pavimento, el ligante deberá de tener el valor más bajo posible de “Jnr” para que sea resistente a la deformación permanente (plástica). El método de prueba AASHTO T350 calcula el valor de Plasticidad (Compliance) “Jnr” del ligante asfáltico aplicando un esfuerzo en forma de creep de 100Pa y otro de 3200Pa durante un segundo para después dejarlo recuperarse durante 9 segundos. En ese momento, se mide la deformación no recuperada y se calcula el valor de “Jnr” dividiendo el esfuerzo empleado entre esta deformación no recuperada, por eso la letra J tiene como subíndice las letras nr. Esta aplicación del esfuerzo y relajación se hace diez veces por cada esfuerzo aplicado y se obtiene el promedio del valor de Jnr a la temperatura de prueba, que será la temperatura máxima del pavimento.

Un ligante asfáltico resistente a la deformación permanente deberá de tener un valor de Plasticidad “Jnr” a 3.2KPa lo más bajo posible

(menor a 0.5 KPa-1) y un alto Índice de Flexibilidad (mayor a 7). En la gráfica de la Figura 6 podemos observar estos valores de control. Hasta el momento no hemos encontrado un ligante con un alto desempeño (Índice de Flexibilidad mayor a 10 y Jnr menor 0.5KPa-1). Este ligante ideal sería un ligante flexible (dúctil) a temperatura intermedia y rígido a alta temperatura. En la determinación del Índice de Flexibilidad recomendamos que el ligante sea previamente oxidado en RTFO y PAV. El ensayo debe de hacerse a la temperatura promedio del pavimento que, en muchas ocasiones, es de 25°C. Para la determinación del valor Jnr recomendamos que el ligante sea previamente oxidado en RTFO (indicativo del inicio de vida del pavimento) y que el ensayo se haga a la temperatura máxima del pavimento que, en la mayoría de los casos, es de 64°C.

La gráfica de la Figura 6 es la propuesta de este estudio para el grado de selección de un ligante asfáltico de alto desempeño que se basa en un ligante resistente a la fisuración por fatiga con un Índice de Flexibilidad entre 10 y 14, pero también resistente a la deformación permanente (plástica) con un valor de Plasticidad "Jnr" a 3.2KPa entre 0 y 0.5KPa-1.

La gráfica de la Figura 7 es la otra propuesta de este estudio para el grado de selección de un ligante asfáltico de alto desempeño que se basa en un ligante resistente a la fisuración por fatiga con un Índice de Tenacidad entre 1.500 y 2.000 (Joules/m2)*mm pero también resistente a la deformación permanente (plástica) con un valor de Plasticidad "Jnr" a 3.2KPa entre 0 y 0.5KPa-1.

Conclusiones

El método de prueba propuesto en estudio aplica una carga en forma de esfuerzo cortante a una muestra de ligante asfáltico a ciertas condiciones de temperatura y frecuencia para que este se deforme de manera progresiva y lineal, generando un daño en su estructura. Esta deformación es convertida a despla-

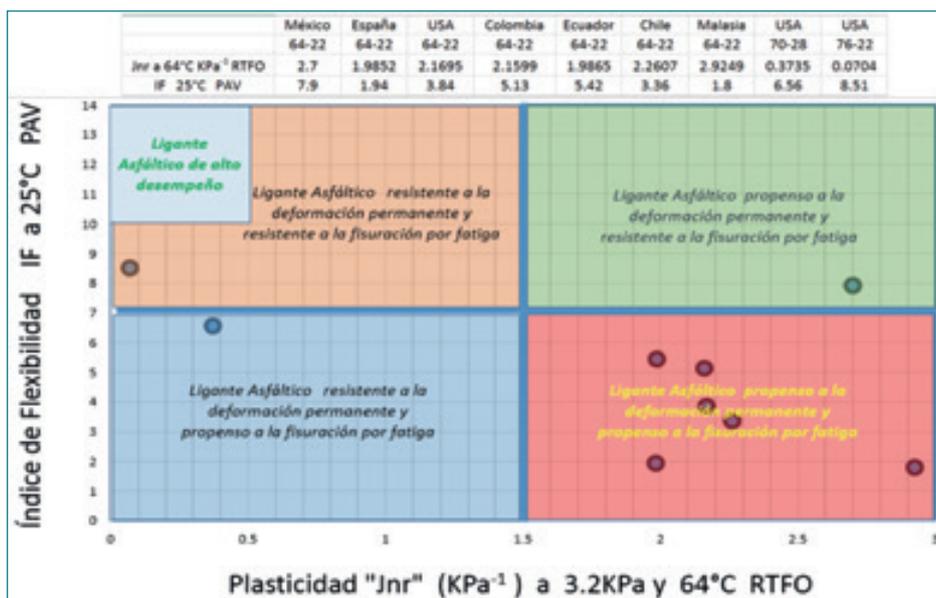


Figura 6. Gráfica para la selección de un ligante asfáltico resistente a la fisuración por fatiga (alto Índice de Flexibilidad) y resistente a la deformación permanente (bajo valor de Plasticidad Jnr a 3.2KPa).

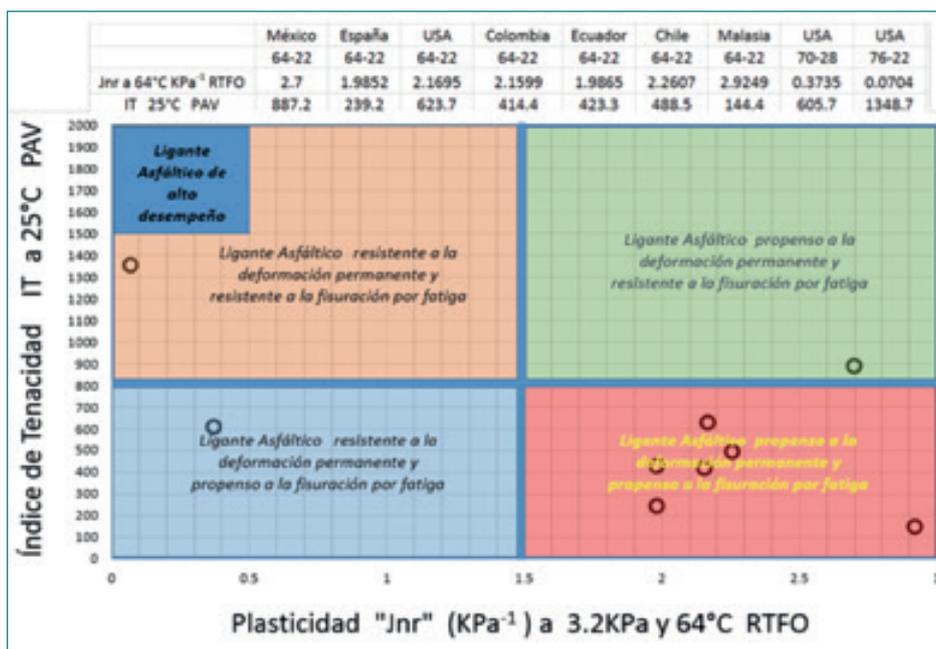


Figura 7. Gráfica para la selección de un ligante asfáltico resistente a la fisuración por fatiga (alto Índice de Tenacidad) y resistente a la deformación permanente (bajo valor de Plasticidad "Jnr" a 3.2KPa).

miento y, con estos datos, se elabora una gráfica de Carga vs Desplazamiento que nos proporciona diversos parámetros, los cuales nos permiten determinar el potencial de fractura de cualquier ligante asfáltico.

El método de prueba propuesto en el estudio proporciona los datos necesarios para elaborar la gráfica Carga vs Desplazamiento, obteniendo los parámetros de Índice de Flexibilidad (IF), si se utiliza el procedimiento ILLINOIS, e Índice de Tenacidad (IT) si se utiliza el procedimiento FÉNIX, con un coeficiente de variación del 2%.

El método de prueba propuesto en el estudio proporciona los datos necesarios para elaborar la gráfica Carga vs Desplazamiento a diferentes temperaturas y frecuencias.

Los parámetros de Índice de Flexibilidad (IF) e Índice de Tenacidad (IT) obtenidos con el método propuesto en este estudio en conjunto con el valor de Plasticidad (Jnr) obtenido utilizando la prueba MSCR AASHTO T350, nos permiten determinar un ligante asfáltico resistente a la fisuración por fatiga y resistente a la deformación permanente (plástica); con este ligante el diseñador de la mezcla asfáltica podrá encontrar la formulación óptima de la misma.

Conclusiones utilizando los parámetros del procedimiento ILLINOIS

- Los Índices de Flexibilidad de los ligantes asfálticos PG 70-28 y PG 76-22 después de ser oxidados en la prueba RTFO (AASHTO T 240) fueron muy similares a los Índices de Flexibilidad de la mezcla asfáltica fabricada con estos ligantes, obtenidos siguiendo el método de prueba AASHTO TP 124-18, es decir, el ligante PG 70-28 presentó el mayor Índice de Flexibilidad en ambos ensayos.
- Al comparar el Índice de Flexibilidad de los ligantes asfálticos (después de ser oxidados en la prueba PAV AASHTO TP 240) procedentes de diferentes países pero con el mismo grado PG de 64-22 (AASHTO M 320-19), el ligante procedente de México fue el que mostró el mayor Índice de Flexibilidad, 7,9, indicativo de un mayor potencial de resistencia fractura; en cambio, el grado PG indica que este potencial será igual para todos los ligantes.

Conclusiones utilizando los parámetros del procedimiento FÉNIX

- El Índice de Tenacidad de los ligantes asfálticos PG 70-28 y PG 76-22 después de ser oxidados en la prueba RTFO (AASHTO T 240) fue muy similar al Índice de Tenacidad de la mezcla asfáltica fabricada con estos ligantes obtenido siguiendo el método de prueba AASHTO TP 124-18 pero utilizando los parámetros del ensayo FÉNIX, es decir, el ligante PG 70-28 presentó el mayor Índice de Tenacidad en ambos ensayos.
- Al comparar el Índice de Tenacidad de los ligantes asfálticos (después de ser oxidados en la prueba PAV AASHTO TP 240) procedentes de diferentes países pero con el mismo grado PG de 64-22 (AASHTO M 320-19), el ligante procedente de México fue el que mostró el mayor Índice de Tenacidad, 887.2 (Joules/m²)*mm, indicativo de un mayor potencial de resistencia a la fractura; en

cambio, el grado PG indica que este potencial será igual para todos los ligantes.

Referencia bibliográficas

- I. ASPHALT, Magazine of the Asphalt Institute. Summer, 2019. Volume 34: page range 25-28.
- II. IX Jornada Nacional ASEFMA 2014. Comunicación 27, Criterios y Especificaciones para el uso del Ensayo FÉNIX en el Diseño de Mezclas Bituminosas Tipo AC.
- III. Fujie Zhou^a, Soohyok Ima, Lijun Sun^b & Tom Sculliona. ^aTexas A&M Transportation Institute, College Station, Tx, 77843, ^bTongji University, Shanghai, China, 200092.
- IV. Evaluación del Proceso de Fisuración en las Mezclas Bituminosas mediante el desarrollo de un nuevo ensayo experimental - ENSAYO FÉNIX -Realizada por: Gonzalo Alfonso Valdés Vidal Director: DR. Félix Edmundo Pérez Jiménez. Barcelona-España 2011.
- V. Experimental Design for Field Validation of Laboratory Tests to Assess Cracking Resistance of Asphalt Mixtures. Draft Final Report Prepared for National Cooperative Highway Research Program Transportation Research Board of The National Academies. Fujie Zhou, David Newcomb, Charles Gurganus, Seyedamin Banihashemrad, Eun Sug Park, Maryam Sakhaeifar and Robert L. Lytton.
- VI. Applied Rheology. First Edition. Thomas G. Mezger. ISBN 978-3-9504016-0-8.
- VII. Asphalt Binder Testing. Third Edition. Asphalt Institute. ISBN 978-1-934154-64-9.
- VIII. Standard Method of Test for Determining the Fracture Potential of Asphalt Mixtures Using the Flexibility Index Test (FIT). AASHTO Designation: TP 124-18. ■



**acceso
al trabajo
completo**

DANOX[®] RAP-100

UNA NUEVA VIDA
AL BETÓN ENVEJECIDO



LA SOLUCIÓN SOSTENIBLE Y
ECONÓMICA PARA AUMENTAR LA TASA
DE RAP EN MEZCLAS DE RECICLADO



Un nuevo modelo de peaje urbano. Aplicación a Barcelona

A new model of urban toll. Application to Barcelona

Juan Pedro HORMIGO VENTURA

*Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. ETSECCP.
Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona Tech.*

Mateu TURRÓ CALVET

*Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Catedrático de Transportes. ETSECCP.
Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona Tech.*

RESUMEN

Los peajes urbanos actuales de tipo cordón o área permiten regular la entrada de vehículos en las ciudades evitando problemas de congestión y deterioro ambiental, pero los usuarios no pagan por el uso real de la red, beneficiando a los que más congestionan. Se propone un nuevo modelo de peaje urbano en que los automovilistas pagarán por usar la red básica de transporte en función de la distancia recorrida y, en su caso, de las externalidades generadas, pero gozarán de mejor servicio. La tarifa depende de la distancia, obtenida con tecnología de navegación satelital y de telefonía móvil, y del tipo de vehículo. El esquema propuesto es más eficiente que los esquemas de peaje urbano existentes. Además de reducir el tráfico, genera importantes ingresos netos que pueden utilizarse en movilidad sostenible y espacio público. La aplicación a Barcelona muestra la viabilidad de la fórmula cuando hay una red viaria bien estructurada.

PALABRAS CLAVE: Tasa por congestión, Análisis coste-beneficio, Política de transporte urbano, Movilidad sostenible.

ABSTRACT

The current urban tolls allow the regulation of the entry of vehicles into cities avoiding problems of congestion and environmental deterioration, but users do not pay for the actual use of the network, benefiting those who congest the most. A new model of urban tolls is proposed, in which motorists will pay to use the basic transport network based on the distance travelled and, where appropriate, the externalities generated, but will enjoy better service. The rate will depend on the distance, obtained with satellite navigation and mobile phone technology, and the type of vehicle. The proposed scheme is more efficient than existing urban toll schemes. In addition to reducing traffic, it generates significant net income that can be used for sustainable mobility and public space. The application to Barcelona shows the viability of the formula when there is a well-structured street network.

KEY WORDS: Congestion charge, Cost-benefit analysis, Urban transport policy, Sustainable mobility.

Introducción

Los vehículos, especialmente los de motor de combustión, tienen un gran impacto en la calidad ambiental de nuestras ciudades (Bull, 2003). Entre las posibles medidas que se pueden implementar para desincentivar el uso del vehículo privado en los entornos urbanos y fomentar una movilidad medioambientalmente más sostenible, el “peaje urbano” se ha mostrado entre las más efectivas (Kopp & Prud’homme, 2008). Los estudios desarrollados en las pocas ciudades del mundo que han puesto en marcha esta medida – Singapur (Goh, 2002), Londres (Leape, 2006), Estocolmo (Prud’homme & Kopp, 2006), Milán (Rotaris, Danielis, Marcucci, & Massiani, 2010), Goteburgo (Börjesson & Kristoffersson, 2015), etc.- ponen de manifiesto que la exigencia de una contraprestación económica en forma de tasa diaria o similar para poder acceder con el vehículo privado a zonas urbanas congestionadas, delimitadas por un cordón, reduce de forma eficaz su uso y mejora la calidad ambiental de estas zonas (Crocchi, 2016). Sin embargo, este sistema de peaje de tipo “viñeta” no responde adecuadamente a los principios de “quien usa paga” y “quien contamina paga” prescritos por la Unión Europea (Comisión Europea, 2001) y puede percibirse como injusto porque genera ciertas ventajas, como la reducción del tiempo de viaje solo para aquellos usuarios que están dispuestos a pagar por acceder al área regulada (Santos, 2004), y favorece a los residentes de la zona mientras genera congestión en su periferia. En cualquier caso, en las pocas ciudades donde se ha aplicado el peaje urbano se ha considerado que ha sido una actuación exitosa y cada vez hay más áreas metropolitanas (por ejemplo, Copenhague, Budapest, San Francisco, Santiago de Chile, Sidney y Yakarta) (Grisolía J.M., et al., 2015) que están evaluando su implementación. En España se ha analizado la posibilidad de introducir un cordón de peaje en la ciudad de Madrid (Di Ciommo, F., Monzón, A., Valdés, C. & Wang, 2010) o (Valdés, 2012).

La decisión de aplicar un peaje es, en cualquier caso, muy atrevida desde el punto de vista político porque puede ser motivo de rechazo social (Börjesson, Eliasson, & Hamilton, 2016), sobre todo si hay una cierta percepción de que la medida tiene un ánimo recaudatorio más que ambiental. No obstante, la inevitable oposición a cualquier sistema de pago puede reducirse si los ingresos generados se utilizan para mejorar la sostenibilidad financiera del sistema de transporte público urbano (Börjesson, Eliasson, Hugosson, & Brundell-Freij, 2012) o para otras acciones de interés común. Basso, L.J., and Jara Díaz, 2012 demuestran que, para conseguir la aceptabilidad social, el excedente del usuario debe ser mayor que antes de la implantación del peaje, de manera que el usuario obtenga mayores beneficios que sin el peaje, incluyendo en ellos la mejora de sus opciones de uso del transporte público. En el caso de Londres, en que la tarificación urbana formaba parte de un paquete que incluía mejoras del sistema de transporte público por medio de bajadas

de precios y aumento de frecuencias, la construcción de carriles bici o el alquiler de bicicletas (Litman, 2006), el nivel de la aceptabilidad de la tasa por congestión aumentó desde aproximadamente el 40% antes del cargo, a más del 50% ocho meses después de su introducción (Bhatt, K., Higgins, T., Berg, 2008). Esta fórmula también funcionó en Estocolmo (Eliasson, 2009). Algunos autores (como Shatanawi, Abdelkhalek, & Ferenc, 2020) concluyen que, para mejorar la aceptación pública de los esquemas de pago por congestión, las autoridades deben aumentar su conocimiento previo y explicar claramente el objetivo que persiguen y el efecto positivo que provocará la medida en la vida de las personas.

Este artículo, basado en una tesis doctoral presentada en la Universidad Politécnica de Cataluña (Hormigo, 2020), pretende plantear una discusión sobre cómo deberían diseñarse los futuros peajes urbanos para que sean más justos y eficientes desde un punto de vista económico, tarificando en función de la distancia real recorrida. La ciudad de Singapur ya trabaja en una evolución de su sistema actual de peaje urbano introduciendo la tecnología GNSS^(a) para una tarificación dinámica (Zabic, 2011; Diao, 2018). Aquí se propone un tipo de peaje urbano especialmente concebido para la ciudad de Barcelona que contempla, no solo la aplicación de un esquema tarifario, sino también la reestructuración de la red viaria para jerarquizarla convenientemente, facilitando un servicio diferencial entre una red principal de pago y otra gratuita. Los usuarios de la red principal, que se desplazarían en viales menos congestionados y con menores tiempos de recorrido, pagarían en función de la distancia.

Un nuevo concepto de ciudad para Barcelona

La ciudad de Barcelona es el centro de una de las mayores y más densamente pobladas áreas metropolitanas de Europa. Uno de sus problemas más graves es la contaminación atmosférica, pues supera reiteradamente los niveles máximos de gases contaminantes establecidos en la Directiva 2016/2284 de la Unión Europea (Agència de la Salut Pública de Barcelona, 2018).

La necesidad de mejorar la calidad ambiental para cumplir con la Directiva y las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud llevó al Ayuntamiento de Barcelona a desarrollar medidas dirigidas a fomentar el uso de medios de transporte más sostenibles, además de optar por un cambio de modelo de gestión urbana que, en algunas zonas, ha restringido hasta el extremo la circulación de automóviles (Gyurkovich, Poklewski-koziell, & Duarte, 2019). A pesar de estas medidas, la Agencia de la Salud Pública de Barcelona (ASPB)^(b) estimó que el exceso de contaminación del aire^(c) en Barcelona causó, en 2019, alrededor del 7% de las muertes naturales (unas 1.000 muertes al año), alrededor del 11% de nuevos

a. Algunas ciudades que ya han implementado tasas por congestión están buscando formas de expandir y mejorar sus sistemas. Con la tarificación vial GNSS (*Global Navigation Satellite System*), se puede tarificar a los vehículos por la distancia real que recorren dentro de un área o zona delimitada en lugar de pagar una tarifa de entrada fija. La ciudad de Singapur ya avanza en esta línea.

b. La ASPB dirige y gestiona los centros y servicios de salud pública de la ciudad de Barcelona por encargo del Ayuntamiento y de la Generalitat de Catalunya. Se encarga de velar por la salud de las personas residentes en Barcelona y sus visitantes. Para más información: www.asp.cat

c. El tráfico rodado es uno de los principales responsables de esta contaminación atmosférica, debida principalmente a los NOx, PM10 y PM2.5.

casos de cáncer de pulmón (unos 110 casos anuales) y alrededor del 33% de los nuevos casos de cáncer infantil (unos 525 casos anuales). Este hecho, sumado a las presiones de ciertos grupos vecinales y de entidades ecologistas y defensoras del transporte público, ha llevado a los actuales dirigentes políticos a implementar nuevas medidas que tienen por objeto restringir la movilidad en transporte privado, como la implantación de la zona de bajas emisiones (ZBE Rondes de Barcelona)^(d), activa desde el 1 de enero de 2020, que prohíbe circular a los vehículos más contaminantes.

Algunas autoridades locales catalanas se han planteado en algunas ocasiones aplicar un peaje para acceder a su ciudad y así reducir los niveles de contaminación, pero la idea no ha progresado debido, en parte, a una cierta animadversión a los peajes en Cataluña^(e). La nueva propuesta de peaje urbano para Barcelona, a diferencia del peaje aplicado en su momento para construir autopistas, no tiene la finalidad de facilitar la inversión en nuevas infraestructuras y se inspira en el concepto de «ciudad amable»^(f) y en el modelo urbanístico de supermanzanas^(g) sobre el que el Ayuntamiento de Barcelona lleva años trabajando (Rueda, 2011). El punto clave para esta nueva formulación de la movilidad es una valoración diferente del tiempo de viaje. La política de transporte se ha basado tradicionalmente en que su demanda es derivada del objetivo final del desplazamiento. Conviene, por tanto, reducir su coste generalizado, que incluye el tiempo de viaje, el cual se considera un tiempo «perdido» y, por lo tanto, como una dilapidación de recursos de la sociedad. En el análisis económico, el tiempo de viaje se valora en función de su motivo, asociándolo así a la producción o bienestar perdidos. De hecho, ello ni siquiera refleja el comportamiento de los viajeros (o su predisposición a pagar) porque, en la realidad, éstos toman decisiones teniendo en cuenta muchos otros aspectos y, en particular, quién paga el viaje (Pons, Saurí, & Turró, 2017).

La «nueva» movilidad que se plantea en Barcelona persigue una ciudad amable que armonice y equilibre de forma equitativa todas las dimensiones, sistemas y subsistemas de la ciudad. Es un modelo de «ciudad convivial» (Turró, 2013), en que la movilidad está integrada en la vida urbana y no interfiere negativamente en ella, o lo hace lo menos posible. Para ello se plantea restringir la presencia de vehículos en el espacio público. Simplemente eliminando el aparcamiento en la calle, dejándola prácticamente sólo para peatones y vehículos en circulación, y reduciendo radicalmente la velocidad en las vías de



Figura 1. A la izquierda, en color azul, la red básica de pago, y en color verde la red secundaria gratuita. A la derecha, propuesta de red de peaje urbano para Barcelona soportada sobre la red básica del modelo urbanístico de supermanzanas.

proximidad, se podría conseguir recuperar una gran parte de la superficie de la ciudad para usos de mayor utilidad social. La propuesta que se presenta aquí remite, de alguna manera, al modelo de «supermanzanas», pero es menos radical con relación al uso del automóvil. Aprovechando las oportunidades que ofrecen las nuevas tecnologías, se pretende aplicar una nueva filosofía de segregación de la movilidad.

Un nuevo modelo de peaje urbano: una red viaria urbana segregada según el nivel de calidad

Los sistemas de peaje urbano actuales son mayoritariamente de tipo cordón o de área (Echavarrí, 2008). La tarifa fijada, en general, no depende del tiempo de circulación, ni de la distancia que recorre el vehículo dentro del área, ni tampoco de los niveles de congestión o contaminación generados por el vehículo. El control se realiza mediante cámaras de lectura de matrícula ubicadas en los puntos de entrada/salida del área delimitada o, en el caso de tarificación dentro de un área, con cámaras en su interior. Al no depender el pago del uso de la vialidad (tiempo o distancia), estos esquemas tarifarios no son equitativos entre los usuarios y tampoco entre territorios, ya que suelen generar congestión en las zonas de frontera inmediatamente fuera del cordón (May & Milne, 2000).

El modelo de peaje que se propone para la ciudad de Barcelona plantea tarifas equitativas, basadas en la distancia, y divide la red viaria en dos subredes, una básica de pago^(h) que permitiría menores tiempos de desplazamiento, y otra gratuita con velocidades de circulación muy limitadas. La circulación por la red básica de pago dispondría de mejores ondas verdes, gracias a fases de circulación más largas y a mayor distancia entre semáforos, mientras que las vías secundarias gratuitas estarían subordinadas a dicha coordinación. Por otro lado, la red de autobuses, que desde hace unos años

d. La ZBE Rondes de Barcelona es un área de más de 95 km² que engloba casi todo el término municipal de Barcelona, los municipios de Sant Adrià de Besòs y L'Hospitalet de Llobregat, y parte de los municipios de Esplugues de Llobregat y Cornellà de Llobregat, donde se restringe progresivamente la circulación de los vehículos más contaminantes.

e. Los peajes de las autopistas se han visto con frecuencia como una discriminación con respecto a otras comunidades autónomas del estado español.

f. Podemos decir que la ciudad amable es aquella que armoniza y equilibra de forma equitativa todas las dimensiones, sistemas y subsistemas de la ciudad y la movilidad.

g. Es una nueva célula urbana, que tiene unas dimensiones diseñadas a escala de vehículo y no a escala de peatón, con la que el Ayuntamiento de Barcelona lleva años trabajando. La supermanzana pretende desarrollar una nueva «geometría» de la ciudad mediante la agrupación de las manzanas del Ensanche diseñado por Cerdà (el caso más usual agrupa 3x3 de las actuales manzanas). El modelo jerarquiza la red viaria y deja el interior de estas zonas exclusivamente para peatones y ciclistas y algún transporte colectivo, y solo permite el acceso local a los automóviles (Rueda, 2016).

h. Esta red coincidiría con la red básica del modelo urbanístico de supermanzanas impulsado por el Ayuntamiento de Barcelona.

se ha adaptado al trazado de las calles del centro de Barcelona y ya es ortogonal en buena medida, sería adaptada para encajar sus recorridos a la red básica. La velocidad comercial de los autobuses sería más elevada, gracias a la menor congestión, a los carriles-bus y al diseño de las aceras de la red básica (sin aparcamiento y permitiendo, en la derecha de la marcha, un acceso fácil a los autobuses).

El peaje como precio por un servicio (“*service pricing*”) fue ya propuesto por Robusté (2002) para el caso de peajes interurbanos. La idea del usuario del peaje como comprador de un servicio de calidad se aplica aquí a un entorno urbano de mayor complejidad. En todo caso, si el pago obedece a una mejora del nivel de servicio debería tener una buena aceptación social, sobre todo teniendo en cuenta que las tarifas a aplicar serán relativamente bajas, en particular comparándolas con las tarifas de aparcamiento, y solo disuasivas para aquellos viajes en automóvil que puedan evitarse o realizarse en modos de transporte sostenibles.

Para poner en práctica el nuevo modelo de peaje urbano basado en la distancia será necesario recurrir a la tecnología satelital GNSSⁱ y a las comunicaciones móviles e inalámbricas (Zabic, 2011). Cada vehículo deberá tener instalado un transpondedor OBU^j con comunicaciones móviles y GPS^k, capaz de almacenar como mínimo, para cada viaje, la siguiente información: hora y fecha de inicio-fin de viaje, duración, distancia recorrida y peaje a pagar. Sería posible también utilizar, como alternativa al OBU, el teléfono móvil. Los temas de privacidad y de posibles fallos (no disponibilidad del teléfono, uso inadecuado, etc.) deberán tratarse, en este caso, con la debida atención. Con un simple equipamiento adicional^l, el sistema permitiría ligar la tarifa al nivel de contaminación generado por cada vehículo e incluso relacionarla con los índices de polución de la ciudad.

El sistema supondría inversiones en el sistema de gestión y control de tráfico que prácticamente estarían justificadas solo con el valor de la información recogida, de gran utilidad para la planificación de la movilidad y también territorial. Otra parte importante de la inversión la constituirían los transpondedores que, en principio, deberán adquirir los usuarios^m. En todo caso, el precio unitario de estos transpondedores irá reduciéndose, gracias a la estandarización, a su

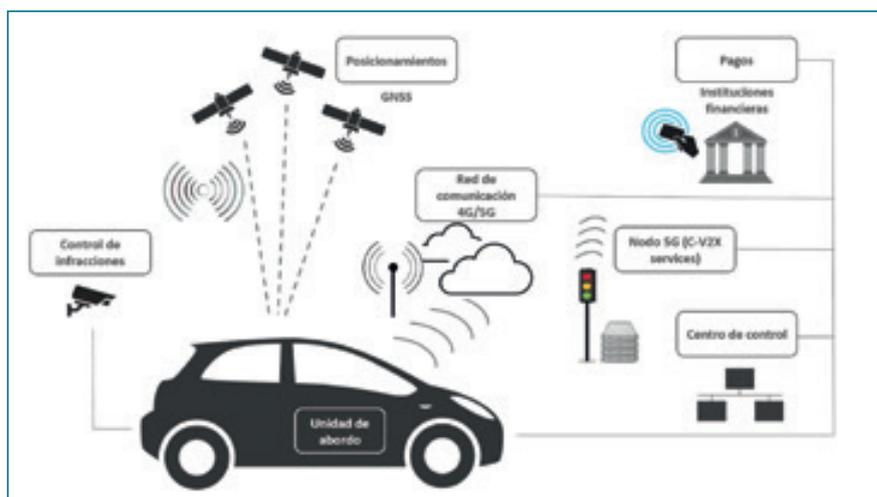


Figura 2. Esquema general del nuevo sistema de peaje urbano. Fuente: Elaboración propia.

integración en todos los nuevos modelos de vehículos y al avance tecnológico. Un esquema con la arquitectura general del modelo de peaje urbano propuesto se presenta en la Figura 2.

La información generada por el nuevo modelo de peaje urbano sería uno de sus principales activos. La defensa de este activo sería esencial para asegurar su continuidad y futuro desarrollo y para ello habrá que cumplir con las exigencias legales (protección de la propiedad intelectual, protección de datos personales, servicios para la sociedad de la información) y dar confianza a los usuarios. El tratamiento de la información deberá ajustarse, en todo caso, a las normas comunitarias vigentes, entre otras la Directiva 95/46/CE relativa al tratamiento de datos personales.

Metodología para analizar la viabilidad del nuevo modelo de peaje urbano para Barcelona

La viabilidad del peaje urbano debe establecerse tanto desde el punto de vista de su impacto sobre la sociedad en términos de recursos, a través del análisis socioeconómico, como de los efectos financieros esperados y de su reparto entre los distintos agentes que intervienen en el proyecto. Para ello primero se ha cuantificado el impacto potencial del peaje sobre el tráfico utilizando un modelo de estimación de la demanda. El modelo empleado es el tradicional de cuatro etapas, aceptado como herramienta válida para la planificación del transporte (Castiglione J., Bradley M., 2014), que permite predecir de una manera razonable el tráfico privado en la red, con y sin la condición externa de peajeⁿ. A partir de una red de transporte

i. Son las siglas en inglés de *Global Navigation Satellite System* para referirse a los sistemas globales de navegación por satélite como el Navstar-GPS, Gionass o Galileo.

j. Son las siglas en inglés de *On Board Unit* para referirse a un dispositivo embarcado en el vehículo con capacidad para comunicarse con otros dispositivos, pudiendo llegar incluso a transmitir su posición.

k. Son las siglas en inglés de *Global Positioning System*. Es un sistema que fue creado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América que permite determinar, en toda la Tierra, la posición de cualquier objeto con una precisión de centímetros. Galileo es el sistema equivalente de navegación europeo, que se está desplegando.

l. Consistiría en un pequeño dispositivo con comunicaciones inalámbricas, conectado al puerto OBD-II del vehículo, que permitiría medir y transmitir los datos del consumo de combustible y las emisiones contaminantes generadas.

m. El modelo de gestión del sistema deberá contemplar si los usuarios compran o alquilan los OBU y si conviene o no subvencionarlos.

n. Se han analizado 3 escenarios tarifarios con las tarifas de 9, 16 y 30 cts/km.

La viabilidad del peaje urbano debe establecerse desde el punto de vista de su impacto sobre la sociedad en términos de recursos, de los efectos financieros esperados y de su reparto entre los distintos agentes que intervienen.



multimodal, una zonificación apropiada del área de estudio y una recolección y codificación de datos suficiente para la calibración y validación del modelo para su uso a nivel de predicción o estimación (escenario futuro para la planificación), el modelo reproduce la generación de viajes en cada zona y su distribución a las demás, reparte los viajes de la matriz origen/destino resultante entre los diferentes modos de transporte y finalmente los asigna a la red (Ortúzar, 2000). En nuestro caso, el modelo se ha construido en Transcad⁽ⁿ⁾ y para su desarrollo se ha contado con el apoyo de la base de datos de BCN Ecología^(o), empleando una zonificación básica de la ciudad. Ha sido posible calibrarlo para simular razonablemente bien la movilidad en vehículo privado de la ciudad antes de la pandemia.

La información sobre los viajes atraídos y generados proviene de la encuesta de movilidad cotidiana (EMEF)^(p) realizada por la Autoridad de Transporte Metropolitano (ATM) de Barcelona. La matriz origen-destino comprende más de 2,8 millones de desplazamientos diarios en modos motorizados, incluyendo viajes internos en Barcelona y de conexión con la ciudad. Para la asignación del tráfico, la matriz de viajes en vehículo privado se ha segregado según los distintos motivos de desplazamiento. Para cada motivo se ha adoptado un valor del tiempo de viaje distinto, estimado a partir del estudio realizado para ATM por TRAM^(q), de manera que la carga sobre cada arco de la red es la suma de los viajes asignados por el modelo correspondiente a cada matriz/motivo. El modelo de asignación se ha podido calibrar para la situación de referencia y se ha utilizado para estimar el impacto de introducir diferentes tarifas de peaje en la red básica. Si bien la información utilizada ha sido previa a la

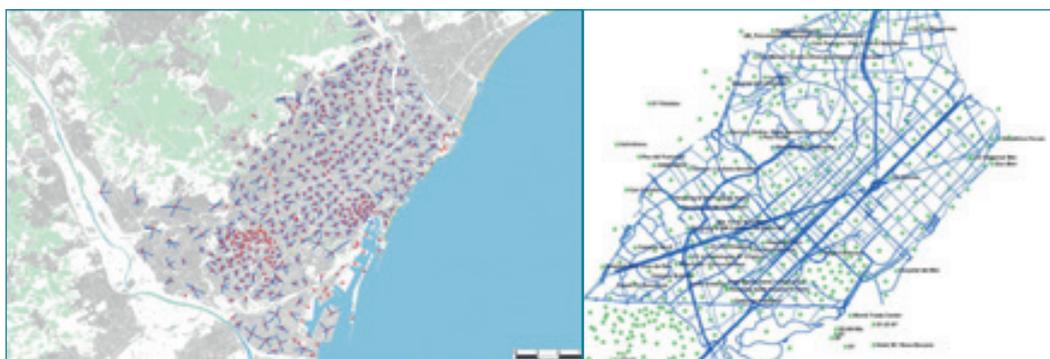


Figura 3. Representación en Transcad del modelo de tráfico de Barcelona.

pandemia, que podría originar cambios profundos en la movilidad de la zona de estudio, la validez del ejercicio no debería verse afectada, sobre todo teniendo en cuenta la robustez de los resultados, como se verá más adelante.

La Figura 4 sintetiza los efectos de la introducción del peaje, que se miden a través de la variación de ciertos indicadores como el número de viajes o los kilómetros recorridos.

En la situación con peaje, XB' representa los viajes que permanecen en la red básica (los que pagan y los exentos); XS_g los viajes que

n. TransCAD es un software de modelación de demanda de viajes.

o. BCNEcología es un Consorcio público formado por el Ayuntamiento de Barcelona, Área Metropolitana de Barcelona (AMB) y la Diputación de Barcelona que realiza proyectos dentro del ámbito de la movilidad destinados a instituciones públicas, fundaciones, organizaciones y empresas de ámbito nacional e internacional. Para más información, www.bcnecologia.es.

p. La encuesta de movilidad en día laborable (EMEF) es una iniciativa de ATM con el objetivo de conocer quinquenalmente la movilidad de la población de la Región Metropolitana de Barcelona; permite analizar los patrones de movilidad en función de las características de la población y de los diferentes territorios. Para más información, <https://www.atm.cat/web/ca/EMEF.php>.

q. TRAM es una empresa concesionaria de ATM que gestiona las dos redes actuales de tranvías en Barcelona. Tram realizó un estudio sobre cuál era el valor del tiempo de viaje en Barcelona para los distintos motivos de viaje, concluyendo que para gestiones y trabajo su valor es de 15,7 €/h; para los commuters 10,7 €/hora; y para tiempo libre y compras es de 7,3 €/h.

proceden de la red básica y se desvían a la red secundaria; XR_B los viajes procedentes de la red básica y que pasan a desplazarse fuera del área intra-rondas; XT_B los viajes que proceden de la red básica y que se transfieren a modos alternativos de transporte (transporte público, a pie, bicicleta); XS los viajes que permanecen en la red secundaria; XB_S los viajes procedentes de la red secundaria que utilizan la red básica; XR_S los viajes procedentes de la red secundaria que se han desplazado fuera del área intra-rondas; y XT_S los viajes que proceden de la red secundaria y que se han transferido a modos alternativos de transporte (transporte público, a pie, bicicleta). Por último, los evaporados_B son los viajes de la red básica que se dejan de hacer y los evaporados_S los de la red secundaria que ya no se hacen.

La Tabla 1 proporciona una síntesis de los resultados obtenidos con el modelo de simulación para diferentes opciones tarifarias.

El argumento para la aceptabilidad del peaje urbano se apoyaría en la disminución del número de viajes o de veh-km equivalentes en vehículo privado y, por ende, de la congestión. Los viajeros actuales que continúen utilizando el automóvil, o sea aquellos que están dispuestos a asumir el desembolso adicional que representa el peaje, van a percibir una mejora de la calidad del servicio. Los demás deben tener opciones aceptables, ya sea con trayectos alternativos más lentos o, preferiblemente, utilizando el transporte colectivo u otros modos menos generadores de externalidades, que mejoran sus prestaciones^(r).

Puesto que el modelo de transporte Transcad no contempla la transferencia de viajes desde el vehículo privado hacia otros modos de transporte, para estimar los viajes transferidos hacia el autobús y los modos ferroviarios, se ha tenido que aplicar un modelo de reparto modal desacoplado de la asignación. El modelo de reparto modal que hemos utilizado fue realizado por la empresa Mcrit^(s) en el año 2008, fruto de un estudio realizado para la Generalitat de Catalunya-Departament de Política Territorial i Obres Públiques, denominado "Modelización del reparto modal en el continuo urbano central de Barcelona (CUCB)"^(t). El fundamento teórico sobre el que se basa

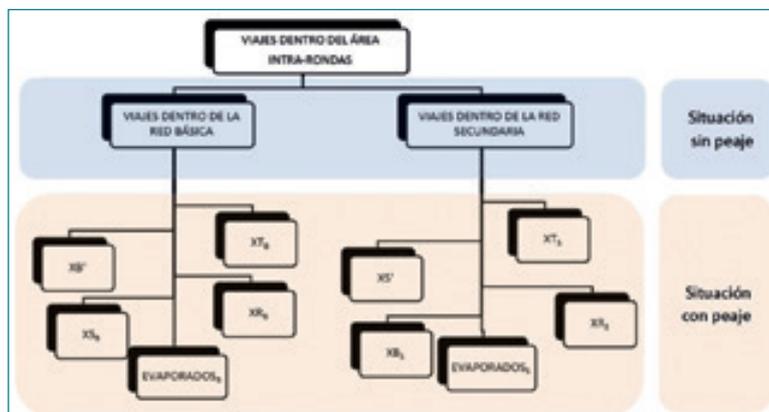


Figura 4. Efectos de la introducción del peaje.

este modelo de reparto es que los viajeros, al enfrentarse a varias alternativas modales, le asignan una utilidad a cada una de ellas y eligen la que la maximiza. La percepción de los usuarios sobre los diferentes modos de transporte se analizó a partir de una campaña específica de encuestas de preferencias declaradas con la que se intentó averiguar los factores que influían en la elección modal y en la disponibilidad a pagar.

Los efectos sobre el tráfico son el factor crítico en el análisis de la viabilidad de la aplicación del peaje urbano. En las estimaciones realizadas hay algunos parámetros, como los valores asignados a los ahorros de tiempo, que tienen una incidencia importante en los resultados. Con el fin de acotar los riesgos asociados a la incertidumbre vinculada a la cuantificación de las variables de mayor peso en el análisis socioeconómico y financiero, se ha recurrido al análisis de sensibilidad para ver la robustez de los indicadores de rentabilidad.

Resultados del estudio socioeconómico

El análisis coste-beneficio (ACB) del proyecto ayuda a tomar decisiones, al permitir comparar el beneficio social esperado con el coste de oportunidad de la inversión. A continuación, se presenta una síntesis de los resultados obtenidos para el primer año de funcionamiento, repercutiendo la totalidad de la inversión^(u) al año previo (ver Tabla 2).

Indicador	Escenario base		Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3	
	Red básica	Red secundaria	Red básica	Red secundaria	Red básica	Red secundaria	Red básica	Red secundaria
Tarifa (cts/km)	0	0	9	0	16	0	30	0
Veh-km (*106)	12,5	2,7	10,8	3,8	9,8	4,6	8,6	5,4
Vm (km/h)	26,2	22,8	32,5	19,4	36,3	17,3	42	9,8

Tabla 1. Valor de los indicadores para los distintos escenarios tarifarios.

r. La velocidad comercial de los autobuses y la seguridad para bicicletas y peatones aumenta notablemente.

s. Mcrit, SL. (www.mcrit.com) es una empresa de ingeniería de transporte fundada en 1988 por ingenieros de la Universidad Politécnica de Cataluña- Barcelona Tech interesados en la evaluación del impacto de políticas y actuaciones en el sector.

t. El Continuo Urbano Central de Barcelona (CUCB) es el ámbito de estudio del modelo que agrupa aquel territorio, que es o será utilizado por el transporte público (medios ferroviarios y/o autobús). Agrupa los siguientes municipios: Barcelona, Badalona, Sant Adrià del Besòs, Montgat, Tiana, Santa Coloma de Gramanet, Montcada i Reixac, l'Hospitalet, Esplugues, Cornellà, San Joan Despí, Sant Feliu, Sant Just Desvern, Sant Boi y el Prat.

u. Se ha estimado una inversión inicial del proyecto valorada en 94 M€ de los cuales 47 M€ irían destinados a la adquisición de los dispositivos OBU para los usuarios de vehículo privado.

Estos resultados se han obtenido a partir de un conjunto de modelos de simulación de una cierta complejidad y de parámetros de valoración adaptados a los utilizados para planificar la movilidad en el área metropolitana de Barcelona. Su capacidad para reflejar condiciones normales, o sea sin impactos imprevistos como la Covid, puede considerarse buena.

A la vista de los resultados obtenidos, podemos decir que, a pesar de que cualquier escenario tarifario arroja resultados positivos ya el primer año, una tarifa de 16 cts/km sería la que previsiblemente generaría un mayor beneficio social y podría llegar a reducir un 21% la demanda de tráfico (en veh-km). Según los estudios de BCNEcología, esta reducción de la demanda de tráfico en Barcelona permitiría cumplir con los estándares mínimos de calidad del aire fijados por la Unión Europea. El aumento de esta tarifa se muestra muy disuasorio y no incrementa mucho los beneficios porque la congestión ya se reduce substancialmente con tarifas inferiores. Esta observación nos permite concentrar el análisis en esta tarifa intermedia que se sitúa en el entorno del óptimo socioeconómico.

El cálculo más detallado de la rentabilidad de la inversión se ha efectuado con un ciclo del proyecto de 10 años, en línea con su alto contenido tecnológico. Se han adoptado hipótesis relativamente conservadoras, como que la ejecución del proyecto se realiza en dos años y que el tráfico permanece constante los tres primeros años para después aumentar a razón de un 1% anual^v. A continuación, se exponen los resultados obtenidos para los valores de referencia, que muestran que el proyecto genera una rentabilidad socioeconómica muy elevada, tal como sugería la generación de beneficios ya en el primer año (ver Tabla 3). Desde este punto de vista, la medida habría que adoptarla con gran rapidez.

Se podría argumentar que las hipótesis adoptadas, así como los modelos y los valores utilizados, pueden tener un peso excesivo

1. Efectos del peaje urbano sobre el sistema de transporte	Tarifa		
	9 (cts/km)	16 (cts/km)	30 (cts/km)
1.1. Ahorro del tiempo de los viajeros en VP que utilizan el PU.	116	186	220
1.2. Pérdida de bienestar de los viajeros en VP que no usan el PU.	-4	-10	-21
1.3. Pérdida de bienestar de los viajeros en VP que pasan al TP.	-30	-53	-74
1.4. Pérdida de bienestar de los viajeros desplazados del área intra-rondas.	-13	-27	-83
1.5. Ahorro de costes de funcionamiento del VP.	24	42	58
1.6. Costes de inversión y operación del transporte público adicional para atender el cambio modal.	-17	-30	-41
Subtotal 1	76 M€	108 M€	59 M€

2. Costes del sistema de peaje urbano	Tarifa		
	9 (cts/km)	16 (cts/km)	30 (cts/km)
2.1. Inversión.	-94	-94	-94
2.2. Mantenimiento del peaje urbano.	-3	-3	-3
2.3. Explotación y operación del peaje urbano.	-7	-7	-7
Subtotal 2	-104 M€	-104 M€	-104 M€

3. Externalidades ambientales	Tarifa		
	9 (cts/km)	16 (cts/km)	30 (cts/km)
3.1. Cambio climático.	2	4	6
3.1. Polución atmosférica.	5	7	11
3.2. Ruido.	5	8	12
Subtotal 3	12 M€	19 M€	29 M€

4. Efecto del peaje urbano sobre la salud de las personas (M€)	Tarifa		
	9 (cts/km)	16 (cts/km)	30 (cts/km)
4.1 Mejora de la salud por incremento del ejercicio físico (p.e. caminar) ^w .	21	37	51
Subtotal 4	21 M€	37 M€	51 M€

Tabla 2. Desglose de los beneficios y costes en millones de euros para el primer año del sistema de peaje urbano en Barcelona.

en los resultados y que no se dispone de datos precisos, actualizados y adaptados al cambio importante que representaría el peaje dinámico. Para acotar los riesgos que se podrían derivar

v. Cabe destacar que, según el estudio realizado por Santamarín, Novoa, Racioppi, Olabarria, & Pe, (2006), sustituir viajes motorizados por viajes a pie tiene un impacto considerable en la salud de la población, y particularmente en aquellos individuos que no logran llegar a las recomendaciones de actividad física diaria, provocando un beneficio económico en relación a los costes médicos. Para facilitar la toma de decisiones, la "World Health Organization" ha desarrollado la herramienta HEAT para estimar la reducción de mortalidad que resulta de aumentar la actividad regular de caminar o montar en bicicleta. Esta herramienta de evaluación y economía de la actividad física pretende ser parte de análisis integral coste-beneficio en intervenciones de transporte o proyectos de infraestructura, complementando su análisis. Para más información se puede consultar la web <http://old.heatwalkingcycling.org/>

w. Algunos estudios, como el de (Börjesson et al., 2012), demuestran que los efectos sobre la reducción del volumen de tráfico del peaje urbano de Estocolmo se mantuvieron más o menos estables cinco años después de su aplicación.

	VAN (M€)	AÑOS									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. EFECTO SOBRE EL TRANSPORTE DERIVADO DE LA IMPLANTACIÓN DEL PU	660	0	0	141	146	155	163	170	167	159	150
1.1. Ahorro del tiempo de los viajeros en VP que utilizan el PU.				227	227	225	220	214	205	195	185
1.2. Pérdida de bienestar de los viajeros en VP que no usan el PU.				-8	-7	-5	-4	-1	-0	-0	-0
1.3. Pérdida de bienestar de los viajeros en VP que pasan al TP.				-43	-38	-29	-19	-7	-2	-1	-0
1.4. Viajeros desplazados del área intra-rondas.				-23	-23	-23	-23	-23	-24	-24	-25
1.5. Ahorro de costes de funcionamiento del VP.				23	23	23	23	23	23	24	25
1.6. Costes de inversión y operación del TP adicional para atender el cambio modal.				-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35
2. COSTES DEL SISTEMA DE PEAJE URBANO	-151	-57	-38	-10							
2.1. Inversión.		-57	-38								
2.2. Mantenimiento del peaje urbano.		0		-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
2.3. Explotación y operación del peaje urbano.		0		-7	-7	-7	-7	-7	-7	-7	-7
3. EXTERNALIDADES AMBIENTALES	63	0	0	20	20	20	20	20	20	21	22
3.1. Cambio climático.				4	4	4	4	4	4	4	4
3.2. Polución.				7	7	7	7	7	8	8	8
3.3. Ruido.				8	8	8	8	8	9	9	9
4. EFECTO SOBRE LA SALUD DE LAS PERSONAS	152	0	0	37	37	38	39	41	42	45	47
4.1. Beneficio por el aumento de ejercicio físico.				37	37	38	39	41	42	45	47
BENEFICIO (M€)		-57	-38	188	193	203	212	220	220	215	209
VAN (M€)	823 M€										
TIR (10 años)	119%										

Tabla 3. Resumen de los beneficios y costes en millones de euros para un ciclo del proyecto de 10 años y una tarifa de 16 cts/km.

de ello, se han efectuado análisis de su impacto potencial, estableciendo funciones de probabilidad^(x) de las variables y parámetros de más peso y efectuando simulaciones de tipo Montecarlo. Estos factores se han convertido en variables aleatorias, asignándoles un rango de valores centrado en el adoptado en el análisis de referencia. Las funciones probabilísticas utilizadas para el valor del tiempo, el número de viajes que pasan del vehículo privado hacia el transporte público^(y) y la inversión se definen con criterios de razonabilidad y a partir de ciertos estudios sobre el tema. En la Tabla 4 se muestra un resumen con los valores probabilísticos utilizados.

Una vez definidos los rangos de valores de las variables aleatorias, se ha asignado a cada factor clave su respectiva fun-

Variables aleatorias	Valor más probable (moda)	Valor mínimo	Valor máximo
Valor del tiempo (€/h) de los viajes que utilizan el peaje urbano ^(z) .	13,2	10,7	15,7
Valor del tiempo (€/h) de los viajes que no utilizan el peaje urbano ^(z) .	9	7,3	10,7
Porcentaje de viajes intra-rondas expulsados de la red de peaje que pasan del vehículo privado al transporte público (%) ^(bb) .	(84/85/87)	50	100
Inversión (M€) ^(cc) .	94	80	110

Tabla 4. Resumen del rango de valores de las variables aleatorias definidas.

x. Para las distintas variables se ha utilizado la función de densidad de probabilidad Pert, similar a la triangular, pero con sus colas suavizadas. Presenta un valor mínimo (a), máximo (b) y una moda (c) de modo que es 0 para los extremos (a, b), y sensiblemente afin entre cada extremo y la moda. A pesar de que la función que mejor se adapta a los valores de tiempo de viaje es la lognormal (Turro, 1979), la función probabilística adoptada ha sido también la Pert para facilitar el análisis (sin introducir efectos relevantes).

y. Para definir el rango de valores de los viajes que se transferían desde el vehículo privado hacia el transporte público nos hemos apoyado en el estudio realizado en diciembre de 2019 por el RACC (Reial Automòbil Club de Catalunya) (RACC, 2019) sobre el impacto de la zona de bajas emisiones de Barcelona en la demanda de transporte público.

z. El rango de valores utilizados se basa en el estudio realizado por TRAM para ATM entre los usuarios de Trambaix y Trambesòs.

aa. Se toma como valor más probable el obtenido en el modelo de reparto modal para cada escenario tarifario. Se estima que, de los viajes que dejan de hacerse en vehículo privado tras el peaje urbano, se derivan al transporte público entre un 50% y el 100%. El valor mínimo corresponde al estudio realizado por el Reial Automòbil Club (RACC, 2019) que analiza el impacto de la zona de bajas emisiones de Barcelona sobre la demanda del transporte público.

bb. Representan los porcentajes de viajes transferidos al transporte público para cada situación de peaje según la estimación realizada por el modelo de reparto modal. Los porcentajes de 84%, 85% y 87% corresponden a los escenarios tarifarios de 9 cts/km, 16 cts/km y 30 cts/km, respectivamente.

cc. Se estima como valor más probable de inversión el calculado en el análisis de referencia con un rango de valores que puede oscilar $\pm 20\%$.

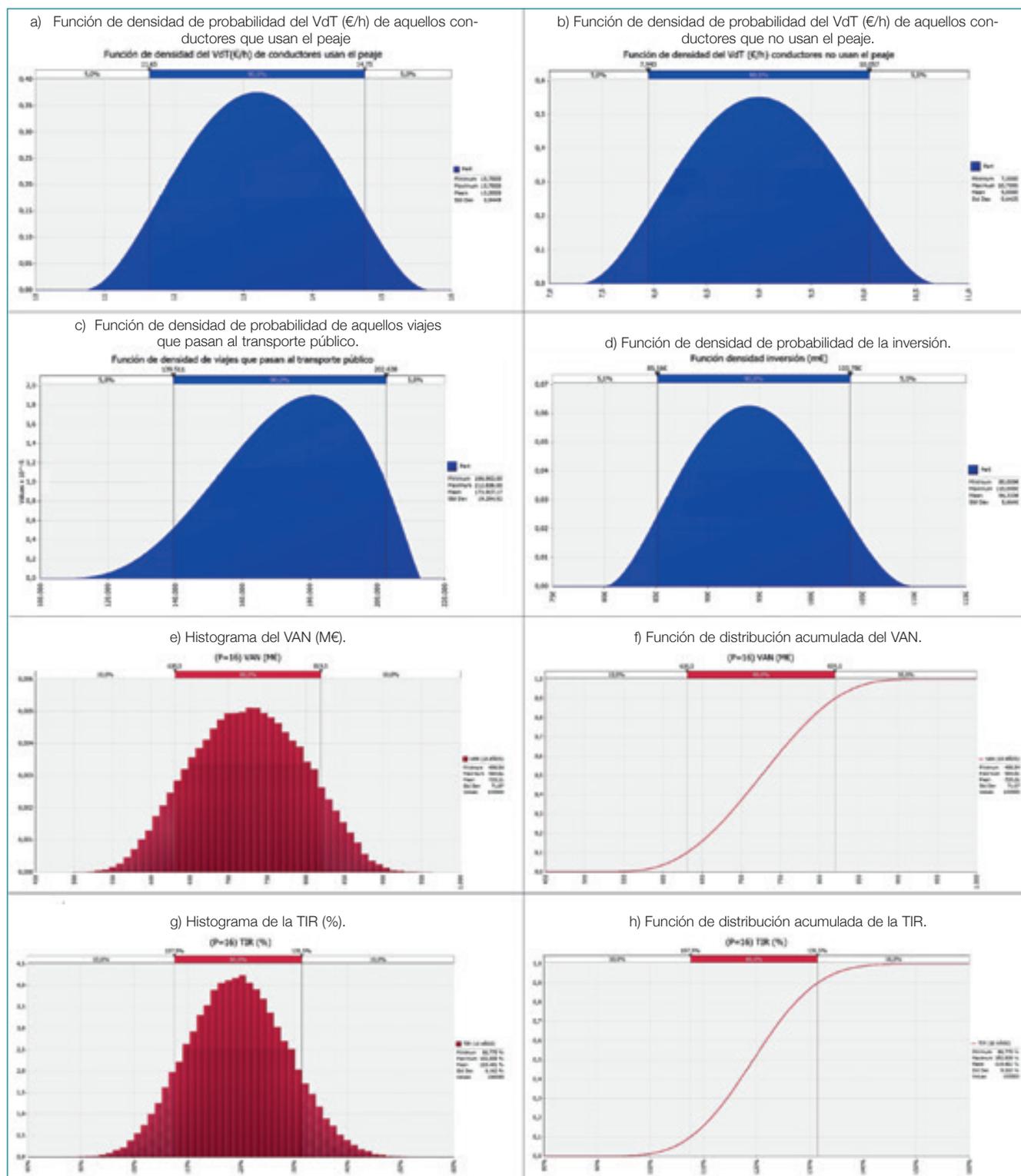


Figura 5. Funciones de densidad de probabilidad e histogramas del VAN y TIR para una tarifa de peaje de 16 cts/km.

ción de probabilidad. Se han realizado 100.000 iteraciones con un grupo de valores obtenido aleatoriamente (método de Montecarlo), con los que se ha recalculado todo el análisis coste-beneficio. En la Figura 5 se muestran las funciones de densidad de probabilidad utilizadas para:

- a) el valor del tiempo de aquellos conductores que usan el peaje;
- b) el valor del tiempo de aquellos conductores que no usan el peaje;

- c) el número de viajes que pasan al transporte público; y, por último,
- d) la inversión; así como los histogramas del VAN y la TIR para el escenario tarifario de 16 cts/km.

Estos resultados indican que un esquema tarifario de 16 cts/km generaría, con una probabilidad del 80%, una TIR socioeconómica comprendida entre 107-131% con un VAN entre 630-819 M€. Esta elevada rentabilidad se consigue, principalmente, por los ahorros de

tiempo generados por la menor congestión y fluidez circulatorias, unidos a los consiguientes efectos positivos sobre el medio ambiente de la ciudad^(dd) y por la previsible mejora de la salud asociada al aumento de la actividad física en aquellos viajeros que optan por modos de transporte más sostenibles. Los resultados son robustos e indican que la aplicación del peaje dinámico sería muy positiva para la sociedad.

Resultados del estudio financiero

Para analizar la rentabilidad desde el punto de vista financiero se ha identificado y sistematizado la información de carácter monetario (inversión, ingresos y costes). Se han adoptado las mismas hipótesis que para el ACB en cuanto a demanda, costes, etc., y otras necesarias para el cálculo financiero, como considerar un incremento de la inversión del 5% para atender a posibles modificaciones del proyecto, suponer que el Ayuntamiento de Barcelona dispone de fondos propios para realizar la inversión, prever que la ejecución del proyecto se llevaría a cabo en 2 años con una planificación de ejecución del 60% el primer año y del 40% el segundo año, estimar un porcentaje del 25% de impagos o considerar exentos de la tasa de peaje los autobuses, motocicletas y ciclomotores. Estas hipótesis deberán ser adaptadas a las decisiones del ayuntamiento, en particular con relación a la tarifa aplicable a los vehículos si se desea relacionarla con las externalidades generadas. En la Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos aplicando una tasa financiera de descuento (bastante elevada) del 10%.

A pesar de que, a la vista de estos resultados, la inversión parece ser muy rentable, pueden existir riesgos derivados de la incertidumbre de ciertos parámetros, como el porcentaje de impagos, las exenciones consideradas o la propia demanda de tráfico. Se ha hecho un análisis de sensibilidad convirtiendo los valores de

	Años									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. INVERSIONES	59	40	0							
1.1. Ejecución proyecto	56	38								
1.2. Inversiones adicionales	3	2								
2. INGRESOS^(ee)	0	0	268	268	268	270	273	279	287	298
2.1. Ingresos por peaje (se incluyen exenciones)			268	268	268	270	273	279	287	298
3. GASTOS^(ff)	0	0	140	140	140	142	143	146	150	156
3.1. Explotación del peaje urbano			7	7	7	7	7	7	7	7
3.1. Mantenimiento del peaje urbano			3	3	3	3	3	3	3	3
3.3. Flota adicional de transporte público		45	45	45	45	46	46	48	50	
3.2. Pérdida de ingresos por tasa de combustible			19	19	19	19	19	20	20	21
3.3. Impagos/uso fraudulento			67	67	67	68	68	70	72	75
MARGEN BRUTO (M€)			127	127	127	129	130	133	137	142
FLUJO DE CAJA (M€)	-59	-40	127	127	127	129	130	133	137	142

T.I.R. PROYECTO (P=16 CTS/KM) T=10 AÑOS	85%
VAN (T=10 AÑOS)	598 M€

Tabla 5. Cuenta de explotación del peaje urbano en Barcelona para una tarifa de 16 cts/km.

Variables aleatorias	Valor probable	Valor mínimo	Valor máximo
Demanda del tráfico ^(gg) (*10 ⁶ vehxkm)	8,8	7,8	9,8
Demanda no exenta del peaje ^(hh) (%)	68	58	78
Impago de peaje ⁽ⁱⁱ⁾ (%)	25	15	35

Tabla 6. Rango de valores de las variables aleatorias definidas.

estas variables en aleatorias, asignándoles funciones de probabilidad de tipo Pert. En la Tabla 6 se resumen los valores utilizados.

De la misma manera que para el análisis socioeconómico, una vez definidas las funciones de densidad de probabilidad, se recalcula todo el análisis financiero (método de Montecarlo). En la Figura 6 se muestran los histogramas del VAN y la TIR para el escenario tarifario de 16 cts/km.

dd. La introducción de la tasa reduce las externalidades negativas y la congestión provocadas por el tráfico, al eliminar viajes en vehículo privado.

ee. La partida de ingresos considera, además de la recaudación por la tasa de peaje urbano, la pérdida de ingresos provocada por la política de exenciones.

ff. La partida de gastos considera los gastos de mantenimiento, operación y explotación del peaje urbano, el incremento de los costes del servicio de transporte público adicional, la pérdida de ingresos por la tasa de combustible, así como una previsión por posibles impagos de la tasa.

gg. A partir del modelo de transporte, hemos obtenido los resultados de la demanda de tráfico. No obstante, en el análisis de riesgo y para estar del lado de la seguridad desde el punto de vista financiero, se ha supuesto que dicha demanda se pueda llegar a reducir en un 20%. Se ha utilizado como valor más probable el del análisis de referencia.

hh. Para el análisis del riesgo se contempla que, por posibles motivos de política municipal, las exenciones inicialmente consideradas puedan variar un 10% con respecto al escenario base. De esta forma, utilizaremos como valor más probable el del análisis de referencia, es decir el 68% no exento, como valor mínimo el 78% no exento y como valor máximo el 58% no exento.

ii. Dado que estamos en un entorno urbano donde probablemente el proyecto sea gestionado por las haciendas locales, se ha aumentado la cuota de impagos desde el 25% hasta un 35%. De esta forma, se establece un rango de impagos que se movería entre el 15%-35%.

En Europa, a pesar de los avances tecnológicos y la presión política, los niveles de contaminación en muchas zonas urbanas siguen siendo superiores a los recomendados por la Comisión Europea y la OMS, generando efectos nocivos para la salud de las personas y para el entorno físico.

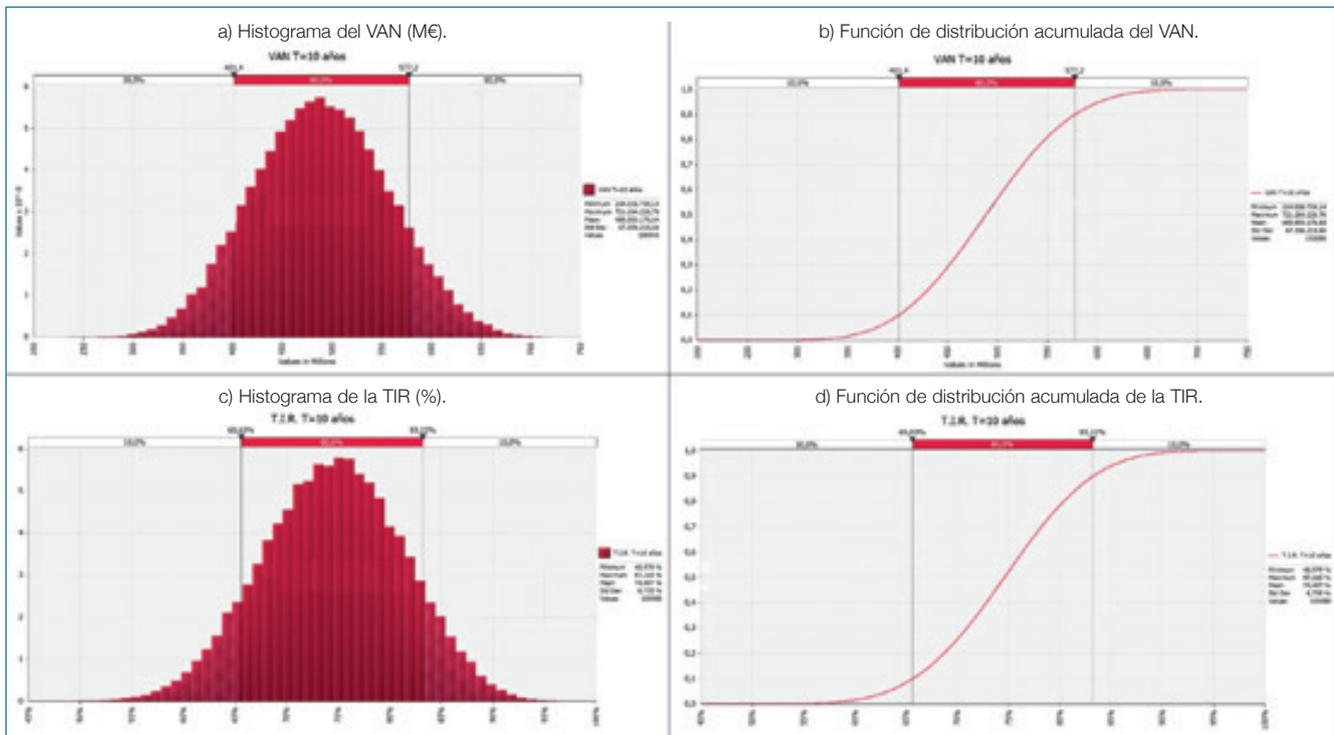


Figura 6. Histograma y función de distribución acumulada del VAN y TIR financiero a 10 años para una tarifa de peaje de 16 cts/km.

Podemos concluir que, para las hipótesis planteadas, el riesgo de obtener resultados financieros negativos para el ciclo de 10 años es prácticamente nulo, a pesar de la elevada exigencia de rentabilidad (10%). Atendiendo al gráfico anterior, tendríamos un 80% de probabilidad de que el VAN del proyecto se situase entre los 401 M€ y los 577 M€, con una TIR comprendida entre el 66% y el 83%. El proyecto sería una gran fuente de ingresos para la administración pública^{jj}, que podría dedicar estos fondos a la mejora del sistema de transporte colectivo, del espacio público y, posiblemente, a compensar ciertas pérdidas de ingresos de fuentes relacionadas con la movilidad, como el aparcamiento en superficie.

Conclusiones

En Europa, a pesar de los avances tecnológicos y la presión política para mejorar la calidad ambiental, los niveles de contaminación en muchas zonas urbanas siguen siendo superiores a los recomendados por la Unión Europea y la OMS (European Environment Agency, 2019). Esta contaminación, principalmente ocasionada por el tráfico rodado, genera una serie de efectos nocivos tanto para la salud de las personas como para el entorno físico. Barcelona ha sido amenazada con sanciones por la Comisión Europea por sobrepasar los niveles límites de contaminantes atmosféricos y ha implementado algunas

jj. Aunque, para facilitar la discusión, se ha considerado el proyecto como una responsabilidad del Ayuntamiento de Barcelona, es evidente que el proyecto afecta claramente a todo el ámbito metropolitano y también a otras comarcas catalanas. La gobernanza del peaje urbano y, por tanto, de las distintas posibilidades de gestión y financiación del mismo, es un tema que merecería un estudio en profundidad.

medidas regulatorias sobre la utilización del espacio público (zonas peatonales o con severas restricciones a los vehículos, carriles bus, etc.) y sobre el aparcamiento y, en algunos casos, sobre el acceso de determinados vehículos a zonas sensibles. Los resultados han sido positivos pero globalmente insuficientes para conseguir que la ciudad alcance los objetivos de convivencia y de calidad ambiental deseados.

Parece necesario, por tanto, plantearse la implementación de nuevos instrumentos que permitan un mayor grado de efectividad en el desarrollo de la movilidad sostenible. El peaje urbano ha aparecido como uno de los que tiene mayor potencial, pero la experiencia internacional muestra que las tarifas de los modelos actuales no dependen del uso de la infraestructura ni de la contaminación realmente generada por el vehículo; además no ofrecen alternativas gratuitas dentro del área tarifada. Por ello se ha planteado un nuevo modelo de peaje urbano dinámico que solvente estos inconvenientes. En él se actúa sobre el tipo de tarifa y sobre la jerarquía viaria urbana, reestructurándola y ligando la tarifa al servicio y, si es preciso, a las externalidades generadas, en línea con los principios de la Unión Europea de “quien usa y contamina paga”. Los últimos avances tecnológicos hacen posible su implementación combinando la tecnología de navegación satelital con las comunicaciones móviles y el despliegue futuro de la red de comunicaciones 5G^(kk), que podría llegar a permitir la total conexión del vehículo con su entorno.

En este artículo, a partir de la información disponible, se han evaluado los efectos que tendría la implantación de este nuevo modelo de peaje urbano en Barcelona. Se han comparado distintos escenarios tarifarios concluyendo que con una tasa óptima de 16 cts/km se conseguiría una reducción del 21% de la demanda de tráfico, lo que permitiría cumplir con los estándares de calidad del aire fijados por la UE. Al mismo tiempo, la medida permitiría aumentar la velocidad comercial del autobús urbano. Este factor, asociado a mejoras de capacidad del transporte público, debería facilitar el trasvase de movilidad a modos de transporte más sostenibles que vendría también favorecido por una serie de actuaciones dirigidas a reducir la capacidad vial en la red secundaria y a recuperar espacio público en la ciudad (aceras, carriles bici, etc.). La implantación de las supermanzanas en Barcelona sería una fórmula evidente de actuación en este sentido. Finalmente, se demuestra que la rentabilidad del proyecto sería muy elevada y que generaría recursos financieros capaces de reducir considerablemente los déficits de inversión y operación del transporte público.

La metodología utilizada en este trabajo académico debería facilitar la elaboración de un estudio con datos actualizados que, dada la robustez de los resultados obtenidos, probablemente confirmaría la elevada rentabilidad de la propuesta y su capacidad para reducir considerablemente los déficits de inversión y operación del transporte público, compensando sus posibles efectos regresivos. El indudable impacto sobre la vida urbana de la medida requeriría, en todo caso, una formulación política con gran participación ciudadana.

Referencias bibliográficas

- I. Agència de la Salut Pública de Barcelona. (2018). Informe de qualitat de l'aire de Barcelona, 2018.
- II. Basso, L.J. & Jara Díaz, S. (2012). Integrating congestion pricing, transit Subsidies and mode choice. *Transportation Research Part A*, 46, 890–900.
- III. Bhatt, K., Higgins, T. & Berg, J. T. (2008). Lessons learned from international experience in congestion pricing. US Department of Transportation & Federal Highway Administration.
- IV. Börjesson, M., Eliasson, J. & Hamilton, C. (2016). Why experience changes attitudes to congestion pricing: The case of Gothenburg. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 85, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.12.002>
- V. Börjesson, M., Eliasson, J., Hugosson, M. B. & Brundell-Freij, K. (2012). The Stockholm congestion charges-5 years on. Effects, acceptability and lessons learnt. *Transport Policy*, 20, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2011.11.001>
- VI. Börjesson, M. & Kristoffersson, I. (2015). The Gothenburg congestion charge . Effects , design and politics. *Transportation Research Part A*, 75, 134–146. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.03.011>
- VII. Bull, A. (2003). Congestión del tránsito. El problema y cómo enfrentarlo.
- VIII. Castiglione J., Bradley M. & G. J. (2014). Activity-Based Travel Demand Models: A Primer. *Transportation Research Board*. <https://doi.org/10.17226/22357>
- IX. Comisión Europea. (2001). Libro blanco. La política europea de transportes de cara al 2010: la hora de la verdad. Retrieved from https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/themes/strategies/doc/2001_white_paper/lb_texte_complet_es.pdf
- X. Croci, E. (2016). Urban road pricing : a comparative study on the experiences of London , Stockholm and Milan. *Transportation Research Procedia*, 14, 253–262. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.062>
- XI. Di Ciommo, F., Monzón, A., Valdés, C. & Wang, Y. (2010). The simulation of a toll-ring scheme for madrid : an efficiency. In *Actas del XVI Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte y Logística*. Lisboa 2010. (pp. 1–21).
- XII. Diao, M. (2018). Towards sustainable urban transport in Singapore: Policy instruments and mobility trends. *Transport Policy*, (November 2016), 0–1. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.05.005>

kk. Son las siglas utilizadas para referirse a la quinta generación de tecnologías de comunicaciones inalámbricas móviles. Más allá de la mejora de la velocidad, se espera que la 5G desate un ecosistema masivo de IoT (Internet de las cosas) donde las redes pueden satisfacer las necesidades de comunicación de miles de millones de dispositivos conectados, con las compensaciones correctas entre velocidad, latencia y costo.

- XIII. Echavarrí, J. P. (2008). La experiencia internacional en peajes urbanos. Cuadernos de Investigación Urbanística, 58.
- XIV. Eliasson, J. (2009). A cost-benefit analysis of the Stockholm congestion charging system. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 43(4), 468–480. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2008.11.014>
- XV. European Environment Agency. (2019). Air quality in Europe — 2019 report.
- XVI. Goh, M. (2002). Congestion management and electronic road pricing in Singapore. *Journal of Transport Geography*, 10(1), 29–38. [https://doi.org/10.1016/S0966-6923\(01\)00036-9](https://doi.org/10.1016/S0966-6923(01)00036-9)
- XVII. Grisolia J.M., L. F. & O. J. de D. (2015). Increasing the acceptability of a congestion charging scheme. *Transport Policy*, 39, 37–47.
- XVIII. Gyurkovich, M., Poklewski-koziell, D. & Duarte, C. M. (2019). Supermanzana in Practice . Ability to Create People Friendly Spaces upon the Example of Selected Barcelona-Based Projects. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/9/092010>
- XIX. Hormigo, J. P. (2020). Nuevo modelo de peaje urbano vinculado a una segregación del tráfico por niveles de calidad. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona Tech.
- XX. Kopp, P. & Prud'homme, R. (2008). Urban Tolls : Price and Congestion Some Lessons for a Better Urban Public, 1–31.
- XXI. Leape, J. (2006). The London Congestion Charge. *The Journal of Economic Perspectives*, 20, 157–176.
- XXII. Litman, T. (2006). London congestion pricing. Implications for Other Cities. Victoria Transport Policy Institute.
- XXIII. May, A. D. & Milne, D. S. (2000). Effects of alternative road pricing systems on network performance. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 34(6), 407–436. [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(99\)00015-4](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(99)00015-4)
- XXIV. Ortúzar, J. (2000). Modelos de demanda de transporte. (Alfaomega Grupo Editor., Ed.). Alfaomega Grupo Editor.
- XXV. Pons, A., Saurí, S. & Turró, M. (2017). Matching funding, mobility, and spatial equity objectives in a networkwide road pricing model: case of Catalonia, Spain. *Transportation Research Record*, (2606), 1–8. <https://doi.org/10.3141/2606-01>
- XXVI. Prud'homme, R. & Kopp, P. (2006). The Stockholm toll: an economic evaluation, 1–38.
- XXVII. RACC. (2019). Anàlisi de la capacitat del transport públic als accesos a Barcelona. https://doi.org/http://saladeprensa.racc.es/wp-content/uploads/2019/12/NP-RACC-Capacitat-transport-p%C3%BAblic-BCN_cast.pdf
- XXVIII. Robusté, F. (2002). El peaje en autopistas como precio por un servicio y como garante de sostenibilidad. *Revista de Obras Públicas*, 149(3425), 127–139.
- XXIX. Rotaris, L., Danielis, R., Marcucci, E. & Massiani, J. (2010). The urban road pricing scheme to curb pollution in Milan, Italy: Description, impacts and preliminary cost-benefit analysis assessment. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(5), 359–375. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2010.03.008>
- XXX. Rueda Palenzuela, S. (2011). El urbanismo ecológico. *Urban-e. Revista Académica del Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid*, 1–22. Retrieved from <http://urban-e.aq.upm.es/articulos/ver/el-urbanismo-ecol-gico/completo?lang=0>
- XXXI. Rueda, S. (2016). La supermanzana, nueva célula urbana para la construcción de un nuevo modelo funcional y urbanístico de Barcelona. Agència d'Ecologia Urbana de Barcelona. Retrieved from http://www.bcnecologia.net/sites/default/files/proyectos/la_supermanzana_nueva_celula_poblenou_salvador_rueda.pdf
- XXXII. Santamarín, E., Novoa, A. M., Racioppi, F., Olabarria, M. & Pe, K. (2006). Health impact of motorised trips that could be replaced by walking. <https://doi.org/10.1093/eurpub/cks015>
- XXXIII. Santos, G. (2004). Urban Road Pricing in the U.K. *Research in Transportation Economics*, 9(04), 251–282. [https://doi.org/10.1016/S0739-8859\(04\)09011-0](https://doi.org/10.1016/S0739-8859(04)09011-0)
- XXXIV. Shatanawi, M., Abdelkhalik, F. & Ferenc, M. (2020). Urban Congestion Charging Acceptability: An International Comparative Study.
- XXXV. Turró, M. (1979). El valor social de los ahorros de tiempo en los viajes por carretera en España. Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).
- XXXVI. Turró, M. (2013). La ciudad amable. Working paper.
- XXXVII. Valdés, C. et al. (2012). Simulación de un peaje urbano en la ciudad de Madrid. Un Transporte innovador y sostenible de cara al siglo XXI: X Congreso de Ingeniería del Transporte. Granada 2012.
- XXXVIII. Zabic, M. (2011). GNSS-based Road Charging Systems Assessment of Vehicle Location Determination. Technical University of Denmark. ■



**acceso
 al trabajo
 completo**

Optimización de la gestión ambiental de vehículos en carreteras

Optimization of the environmental management of vehicles on roads

Marta GARCÍA GARCÍA

*Doctora Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos
Profesora Titular. Universidad de Extremadura*

Juan Francisco COLOMA MIRÓ

*Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Profesor Contratado Doctor. Universidad de Extremadura*

Gonzalo FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ

Ingeniero Civil. Universidad de Extremadura

Alessandra BOGGIO-MARZET RICCIO

Ingeniera Civil. Universidad Politécnica de Madrid

RESUMEN

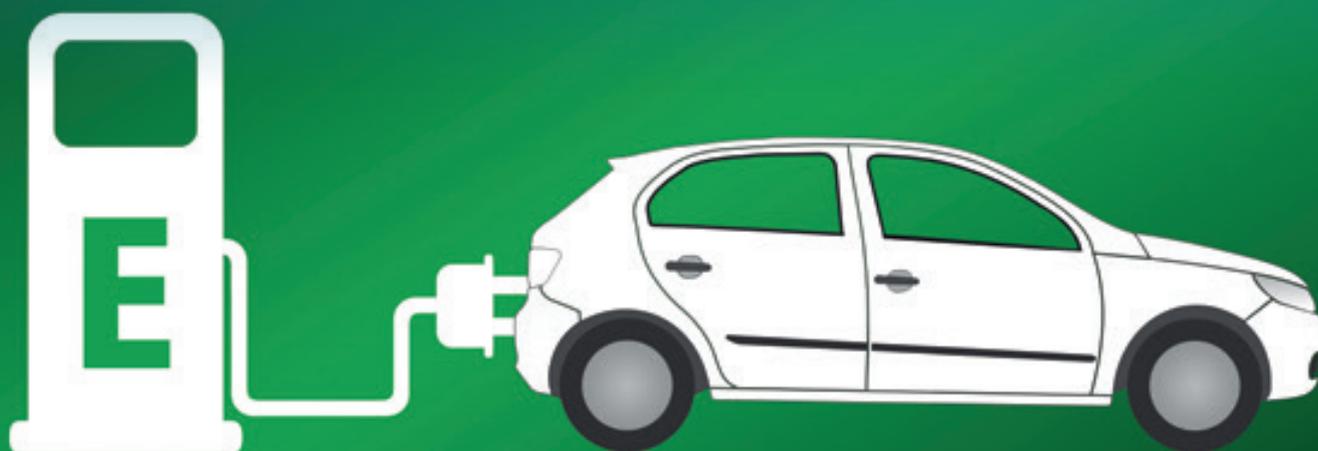
Las técnicas de conducción eficiente (eco-driving) han demostrado ser idóneas para ahorrar combustible y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. En esta investigación se ha analizado tanto el impacto del eco-driving en una gran ciudad como Madrid, como el efecto en una ciudad pequeña como Cáceres, donde los flujos de tráfico no se ven afectados por las horas punta o por la congestión. Los resultados resaltan la bondad de la conducción eficiente en las dos ciudades, consiguiendo ahorros de consumo de entre el 6% y el 25%. Los mayores ahorros de consumo y emisiones se consiguen en la ciudad pequeña y en las vías de mayor capacidad y nivel de servicio. Finalmente, esta investigación demuestra que los conductores de menor experiencia son los que mejor aplican estas técnicas de conducción, por lo que sería conveniente establecer políticas de formación en eco-driving en las autoescuelas.

PALABRAS CLAVE: Conducción eficiente, Eco-driving, Consumo de combustible, Emisiones, Tipo de vía, Tipo de conducción.

ABSTRACT

Eco-driving techniques have proven to be very suitable for saving fuel and reducing greenhouse gas emissions. This research has analyzed both the impact of eco-driving in a big city like Madrid, as well as the effect in a small city like Cáceres, where traffic flows are not affected by peak hours or congestion. The results highlight the goodness of eco-driving in the two cities, achieving consumption savings between 6% and 25%. The greatest savings in consumption and emissions are achieved in the small city and in the roads with the highest capacity and level of service. Finally, this research shows that less experienced drivers are the ones who best apply these driving techniques, so it would be convenient to establish eco-driving training policies in driving schools.

KEY WORDS: Eco-driving, Fuel consumption, Emissions, Road type, Driving behavior.



1. Introducción y estado del arte

Según la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA, 2020), las emisiones de GEI del transporte han aumentado cada año desde 2014, estando un 29% por encima de los niveles de 1990 en 2018 como consecuencia de la creciente demanda en el transporte por carretera de pasajeros y mercancías. Además, la proporción de energía renovable utilizada para el transporte en la UE en 2018 fue igual al 8,1%, por debajo del objetivo de la UE del 10% establecido para 2020 por la Directiva de energías renovables de 2009. Esto indica que los esfuerzos actuales para limitar el impacto ambiental del sector y los impactos climáticos no son suficientes para alcanzar el objetivo político a largo plazo de la UE.

Con esta idea, para avanzar en estos objetivos y acelerar la implementación del Acuerdo de París, en 2019 se celebró en Madrid la 25ª edición de la Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático -COP25-. En esta Conferencia, 73 naciones (España incluida) se comprometieron a convertirse en carbono neutral para el año 2050 (UN, 2019). El acuerdo pide un aumento en la ambición de los compromisos de cambio climático, siguiendo el calendario establecido en el Acuerdo de París, cuyo objetivo era reducir las emisiones de GEI en al menos un 40% para 2030 en comparación con 1990.

En este contexto, los países pueden actuar en varias áreas clave para reducir las emisiones de GEI del transporte. De acuerdo con una estrategia integral de reducción de GEI del sector del transporte, se debería abordar por lo menos las siguientes políticas clave (OECD, 2010):

1. Reducir la demanda de transporte: controlar el uso del suelo para evitar la dependencia del automóvil y aumentar las tasas de ocupación.

2. Modo compartido: medidas destinadas a promover modos más respetuosos con el medio ambiente como el transporte público y los modos no motorizados.

3. Elección de combustible: medidas destinadas a utilizar tecnologías para combustibles alternativos y nuevas fuentes de energía distintas de la gasolina.

4. Eficiencia de combustible: promoción de tecnologías eficientes para vehículos y gestión del tráfico, medidas de reducción de la congestión del tráfico y conducción ecológica.

Esta definición de conducción eficiente incluye algunos conceptos, dependiendo del nivel de decisión (Sivak and Schoettle, 2012):

- Nivel estratégico: Selección de vehículo y mantenimiento.
- Nivel táctico (también llamado eco-ruta): Selección de ruta y carga de vehículo.
- Nivel operacional: Comportamiento del conductor. Este nivel es más conocido como eco-conducción.

Esta investigación se centra en los niveles operacional y táctico, los cuales afectan directamente al tráfico actual: eco-conducción y eco-ruta. Tanto la conducción ecológica como la elección de una eco-ruta, aquella por la cual el consumo de combustible es menor, son soluciones eficientes y de muy bajo coste para la gestión ambiental de las carreteras.

Las investigaciones hasta ahora realizadas utilizan dos enfoques para evaluar el impacto de la conducción ecológica: pruebas de campo y simulaciones de tráfico. En la Tabla 1 se incluye el listado de algunas de las publicaciones más relevantes sobre la conducción eficiente.



Tanto la conducción ecológica como la elección de una eco-ruta, aquella por la cual el consumo de combustible es menor, son soluciones eficientes y de muy bajo coste para la gestión ambiental de las carreteras.

Investigación	Tipo de estudio	Variables	Efectos
Kobayashi et al (2007)	Aceleración moderada y suave. Simulación en red.	Emisiones y tiempo de viaje	Efectos de red. Reducción del 3% en CO ₂ para tráfico medio y bajo e incremento del 12% en la congestión
Henning (2008)	Después de la instrucción en eco-conducción. Prueba en carretera.	Consumo de combustible	Reducción media del 25% del consumo de combustible a corto plazo y del 10% a largo plazo
Fiat, Eco-Drive (2010)	Después de la instrucción en eco-conducción. En carretera con prueba de retroalimentación.	Consumo de combustible	6% de media y 16% de máximo
Qian y Chung (2011)	Aceleración moderada y suave. Simulación en red.	Consumo de combustible, emisiones de CO ₂ y tiempo de viaje.	Efectos de red. Reducción en consumo de combustible del 4% en flujo libre e incremento del 25% en congestión.
Boriboonsomsin y Vu (2011)	Con dispositivo de retroalimentación de conducción ecológica. Prueba en carretera	Economía en el combustible del vehículo	Una media del 6% de reducción en conducción por ciudad y una media del 1% en carretera
Rakha y Kamalanathsharm (2013)	Sistema dinámico V2I. Modelo	Consumo de combustible	Sube al 23,8% la reducción de consumo de combustible
Niu et al. (2013)	Sistema dinámico de eco-conducción. Modelo señalado	Consumo de combustible y emisiones de CO ₂	25% de reducción en consumo de combustible y en emisiones de CO ₂
Xia et al. (2013)	Sistema dinámico de eco-conducción. Simulación de red	Consumo de combustible y emisiones de CO ₂	10-15% de reducción en vehículos individuales. 1-4% en flota dependiendo de la situación del tráfico
Ma et al. (2015)	Modelo combinado vehículo-motor para conductores de autobuses	Consumo de combustible	10% y alcanza un máximo del 20% en diferentes condiciones de la carretera
Díaz-Ramírez et al. (2017)	Flota nacional de mercancías	Consumo de combustible	Reducciones entre el 6,8% y el 5,5%

Tabla 1. Resumen de los estudios sobre investigaciones en eco-conducción.

En la literatura científica se pueden encontrar las ventajas y desventajas de la conducción ecológica, así como gran variabilidad de resultados dependiendo de la heterogeneidad de los conductores y del número de eco-conductores en las vías y de las rutas ecológicas (Xia et al, 2013). Por tanto, en este proyecto de investigación se han analizado los impactos de estos comportamientos desde 3 perspectivas diferentes:

1. En primer lugar, se han tomado medidas reales de numerosos parámetros de conducción a través de una campaña de recolección de datos en distintos itinerarios, tanto en conducción convencional como en conducción ecológica.
2. Con estos datos se han analizado las variaciones individuales en el comportamiento de los conductores y en los parámetros de conducción medidos, se han modelizado – a nivel micro y macro – para evaluar el efecto de diferentes niveles de penetración de eco-conductores en las carreteras, así como las diferentes condiciones de tráfico. Los resultados obtenidos en las micro/macro simulaciones destacan variaciones sustanciales en función del tipo de carretera, las condiciones de tráfico y en niveles de penetración de eco-conducción y eco-ruta. Por tanto, es fundamental analizar la viabilidad práctica de la implementación de estas medidas.
3. Finalmente, se ha realizado una campaña de encuestas y un *focus group* para analizar la aceptabilidad de la conducción

ecológica entre los conductores, así como su grado de concienciación y la disposición de las Administraciones a promocionar la implementación de estas medidas.

Las investigaciones realizadas hasta ahora sobre conducción eficiente se han centrado en conductores no profesionales, conduciendo turismo en distintos tipos de carreteras, vehículos o ciudades, pero no se ha estudiado el efecto de la conducción eficiente en empresas de mensajería cuyos conductores son profesionales y tienen como objetivo realizar un reparto en el menor tiempo posible. Conocido este vacío en la literatura científica, en esta investigación se aplicarán también los objetivos anteriores a conductores profesionales. Para ello, se ha contado con la colaboración de la empresa pública de mensajería española Correos.

2. Metodología

Para lograr los objetivos generales del proyecto, en la investigación se han abordado dos preguntas principales, brevemente resumidas en:

1. ¿Cómo afectan los diferentes factores externos a la eficiencia de la conducción ecológica?
2. Para distintos entornos de conducción, ¿cuáles son los efectos de la conducción y la ruta ecológica en el consumo de combustible y en las emisiones?

Para responder a estas dos cuestiones, se presenta a continuación la metodología de la investigación empleada (Figura 1) dividida en los siguientes pasos:

1. La campaña de recolección de datos: elección de vehículos para el experimento, selección de conductores y rutas en las ciudades elegidas para la realización de la investigación, dispositivos electrónicos para la recogida de los datos de los vehículos (OBD-key).
2. Creación de la base de datos: tratamiento informático de los datos obtenidos con los dispositivos electrónicos OBD-key mediante el programa R y obtención de las bases de datos de cálculo de las variables medidas en el experimento (velocidades, aceleraciones, revoluciones por minuto, paradas...).
3. Filtrado de datos y validación de la base de datos: depuración y detección de errores y/o ausencias de medición de datos en las bases de datos iniciales para obtener las bases de datos definitivas.
4. Análisis de datos: estudio de las distintas variables en conducción convencional y ecológica para los distintos vehículos y conductores para las dos ciudades del experimento.
5. Resultados, conclusiones y política de recomendaciones: se presentan los resultados obtenidos en la investigación y se analizan las conclusiones de la misma.

2.1. Descripción del experimento

La campaña de recogida de datos ha sido coordinada por el Centro de Investigación del Transporte TRANSyT de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y la Escuela Politécnica de Cáceres de la Universidad de Extremadura (UEX). Para el experimento con conductores profesionales, se contó con la coordinación de la empresa pública de mensajería Correos.

2.1.1. Tipos de vehículos

Los vehículos empleados en el experimento (Figura 2 y Tabla 2) para conductores no profesionales han sido un vehículo tipo pequeño (Fiat 500) y otro tipo mediano (Opel Astra), que corresponden aproximadamente al 75% de la flota de vehículos en Madrid y Cáceres. Los coches se alquilaron a la empresa local de coches compartidos Bluemove (<https://bluemove.es/es>). Los dos vehículos están registrados según las normas Euro 5.

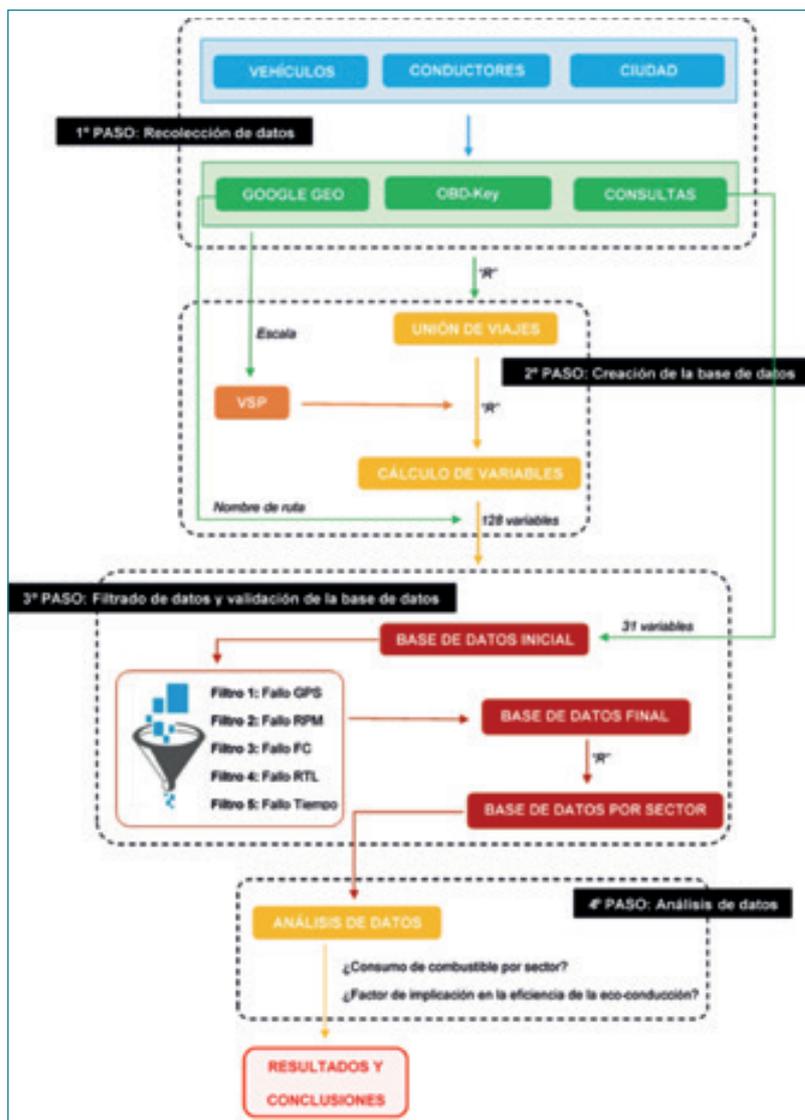


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso metodológico.

Características	Astra	Fiat
Clasificación comercial	Saloon	Mini
Tipo de cambio de marchas	Manual	Manual
Masa máxima autorizada	1393	930
Potencia (CV)	70	77
Dimensiones (LxWxH) (mm)	4419 x 1814 x 1510	3546 x 1627 x 1488
Asientos	5	4
Emissiones (g de CO ₂ /km)	109	115
Clasificación por consumo relativo	C	D

Tabla 2. Información técnica de los vehículos utilizados por conductores no profesionales.



Figura 2. FIAT 500 en conducción y Opel Astra en conducción.

Para el experimento con conductores profesionales se contó con los vehículos expuestos en la Tabla 3 y Figura 3. Se emplearon automóviles de tipo comercial, en este caso furgonetas diésel, con similitudes en sus características técnicas, cuatro de ellas pertenecientes a la gama Kangoo de Renault y la quinta era una Peugeot Partner.

2.1.2. Conductores del experimento

En el caso de Madrid, se contó con 12 personas para conducir los vehículos durante los dos periodos de conducción de 9 días cada uno. Por limitaciones contractuales, los conductores fueron estudiantes y personal académico de la UPM, con edades comprendidas entre los 23 y los 50 años. La muestra fue casi equilibrada por género, siendo 8 hombres y 6 mujeres (Figura 4).

En el caso de Cáceres, fueron también 12 personas las que condujeron los vehículos durante los dos periodos de conducción de 4 días cada uno. Los conductores fueron estudiantes y personal académico de la UEx, con edades comprendidas entre 21 y 44 años, siendo 8 hombres y 4 mujeres.

En ambos casos, Madrid y Cáceres, se contrató a los conductores durante 12 horas/día de conducción en tres turnos de cuatro horas cada uno, cubriendo siempre las horas punta del día.

En cada turno iban dos personas por coche, conductor y asistente, que cambiaban alternativamente cada hora de conducción dentro de un mismo turno. Conducían indistintamente por cada una de las rutas prefijadas en cada itinerario.

Para el experimento con conductores profesionales en Cáceres, se contó con 5 conductores con edades comprendidas entre los 35 y 60 años, todos varones, una muestra representativa en cuanto a la edad, pero no en cuanto a género. Las rutas coincidían con las de los repartos que se debían realizar cada día. Los turnos de trabajo eran el turno de mañana de 7:00 a 14:00 horas y el turno de tarde comprendido entre las 14:00 y las 21:00 horas. Cuatro conductores pertenecían al turno de mañana, y sólo uno era del turno de tarde.

2.1.3. Formación en conducción ecológica

Los 24 conductores no profesionales han recibido formación en conducción ecológica. Este programa formativo ha sido impartido por profesores de dos autoescuelas locales, Autoescuela Abril en Madrid (<http://www.autoeabril.com/autoescuela-Madrid-cursos-conduccion-eficiente.aspx>) y Autoescuela Las Arenas en Cáceres (<https://www.autoescuelalasarenas.com/#inicio>). La formación constaba de una parte teórica y otra parte práctica, desarrollada con la siguiente estructura:



Figura 3. Furgoneta Renault de Correos que participó en el experimento.

com/#inicio). La formación constaba de una parte teórica y otra parte práctica, desarrollada con la siguiente estructura:

1. Sesión de conducción convencional: los participantes conducen los vehículos por la ruta establecida y se registran los diferentes parámetros de su conducción: velocidad media, cambios de marcha realizados y consumo, fundamentalmente.
2. Clase teórica: se explican los conceptos clave de conducción eficiente.
3. Sesión de conducción ecológica: los conductores repiten la conducción por el mismo recorrido que en la primera sesión, para comprobar la efectividad de la formación que han recibido, recogiendo nuevamente los parámetros de su conducción y comparándolos con los anteriores.
4. Sesión final de análisis de los resultados obtenidos.



Figura 4. Algunos de los conductores no profesionales en el experimento en Madrid y Cáceres.

Por otro lado, en el experimento con conductores profesionales de la empresa Correos, durante la primera semana se registraron los viajes de estos conductores durante las jornadas de reparto con su conducción habitual. Posteriormente, los conductores seleccionados recibieron un curso teórico acerca de las técnicas de conducción eficiente para poderlas implementar la semana siguiente en sus repartos diarios. Todos los viajes realizados con conducción ecológica fueron registrados de la misma forma que lo fueron los de la primera semana con la conducción habitual.



Figura 5. Itinerarios monitorizados en la campaña de recopilación de datos en Madrid.

2.1.4. Itinerarios y rutas

Experimento en Madrid

La campaña de recogida de datos se centró en la conexión entre Madrid y dos municipios del noroeste de la ciudad, Pozuelo de Alarcón y Majadahonda. Fueron seleccionados debido al análisis basado en la Encuesta Sintética de Movilidad de la Comunidad de Madrid 2014, en la que se mostraba la cantidad de viajes entre ambos municipios. La campaña incluyó dos itinerarios entre estos dos municipios y la Escuela de Caminos de la UPM (Figura 5). El itinerario llamado CPi une la Universidad con Pozuelo en ambas direcciones y contiene tres rutas (CP1, CP2 y CP3), y el itinerario llamado MPI une Majadahonda con Pozuelo también en ambas direcciones por tres rutas diferentes (MP1, MP2 y MP3).

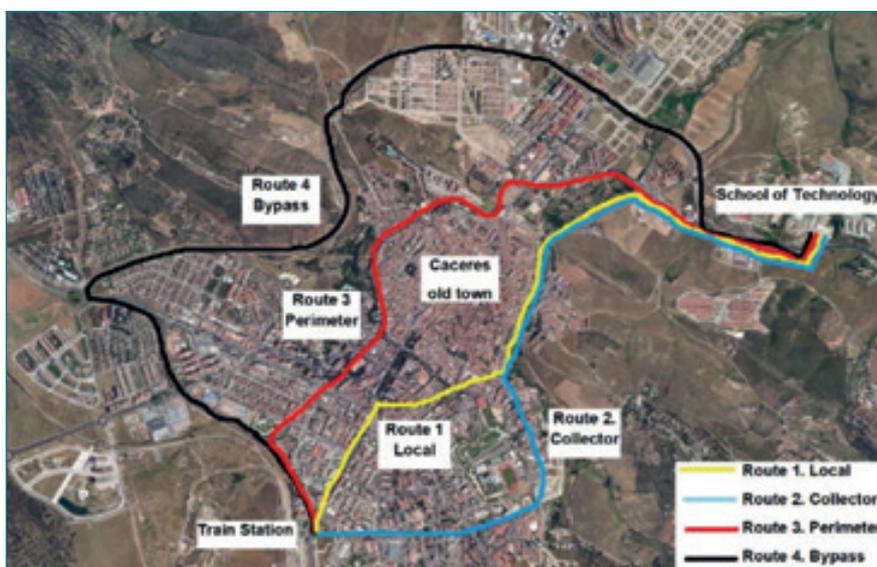


Figura 6. Mapa de las rutas seleccionadas en Cáceres.

Experimento en Cáceres

En la ciudad de Cáceres se ha seleccionado un único itinerario con cuatro rutas diferentes, ya que la ciudad es pequeña y se puede recorrer de lado a lado en menos de 15 minutos. Se parte de la estación de trenes ubicada al oeste y se termina en la Escuela Politécnica (UEX) situada en la parte este de la ciudad. Se han considerado cuatro rutas alternativas con diferentes características y volumen de tráfico, de menor a mayor nivel de servicio: local (ruta 1), colector (ruta 2), perimetral (ruta 3) y variante de población (ruta 4). La Figura 6 muestra en el mapa las cuatro rutas diferentes y sus descripciones.

2.1.5. Equipamiento de abordo

Los datos se han recogido mediante la instalación en el puerto de diagnóstico de los vehículos de un dispositivo OBD-Key (sistema de diagnóstico a bordo) que envía los datos a un teléfono móvil a través de wifi con una frecuencia de 1 Hz (Figura 7).

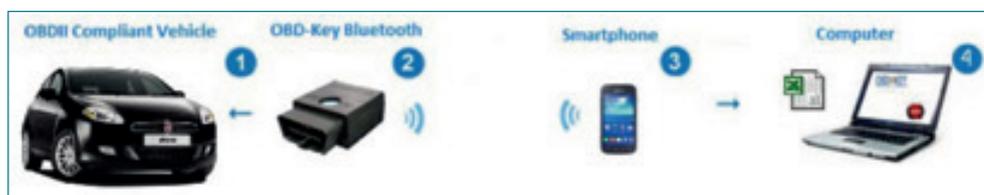


Figura 7. Proceso de recopilación de datos.

Los parámetros que se recopilaban tanto en el periodo de conducción convencional como en el periodo de conducción ecológica han sido:

- Posición GPS (longitud y latitud) y distancia recorrida (km)
- Tiempo de viaje (h)
- Velocidad instantánea (km/h)
- Consumo de combustible (l)
- Número de paradas, rpm, aceleración y desaceleración (m/s²)

2.1.6. Cronología del experimento

Cada día de conducción consta de tres horarios punta de tráfico: de 7:00 a 9:00 h, de 14:00 a 17:00 h y de 17:00 a 20:00 h, que cubren las horas pico del tráfico en los itinerarios marcados. Los turnos tienen una duración de 4 horas y están compuestos por 2 personas, que conducirán dos horas respectivamente, siendo tanto conductor como copiloto durante un mismo turno. Los turnos de conducción se ajustan de manera que se cubren todas las horas anteriores, siempre comenzando de 15 a 20 minutos antes de que comience la hora pico, y terminando la misma 15 o 20 minutos después de terminar la hora pico.

Preguntas	Modo conducción	Respuestas						
		1	2	3	4	5	6	7
El manejo le ha resultado: Fácil (1) – difícil (7)	NO ECO							
	ECO							
El entorno de conducción era: Fácil (1) – difícil (7)	NO ECO							
	ECO							
Durante la conducción estaba: Aburrido (1) - entretenido (7)	NO ECO							
	ECO							
Durante la conducción estaba: Relajado (1) - estresado (7)	NO ECO							
	ECO							

Tabla 4. Formato de encuesta diaria realizada después de cada turno de conducción.

2.2. Encuesta a los conductores al finalizar el experimento

Después de cada turno de conducción, los conductores contestaron una serie de preguntas a través de una encuesta, de manera que se pudiera conocer el estado de ánimo y sentimiento de aquéllos, antes y después de recibir y poner en práctica la formación sobre conducción eficiente. En la Tabla 4 se incluye el formato de encuesta utilizado.

rutas 1 (local) y 4 (variante) con conducción normal y conducción eco, para poder visualizar las diferencias. La conducción eco en ambos casos produce velocidades menores y más homogéneas. El número de paradas y deceleraciones es mayor en la ruta 1 que en la ruta 4 ya que existe un mayor número de intersecciones y semáforos en su recorrido. Las reducciones de velocidad de la ruta 4 se deben a la presencia de las intersecciones, que son todas con glorietas.

3. Resultados

Se describen a continuación los principales resultados obtenidos de las distintas investigaciones realizadas.

3.1. Experimento con conductores no profesionales en Cáceres

Los datos generales del ensayo realizado en la ciudad de Cáceres se resumen en la Tabla 5.

La Figura 8 representa la evolución de la velocidad instantánea en las

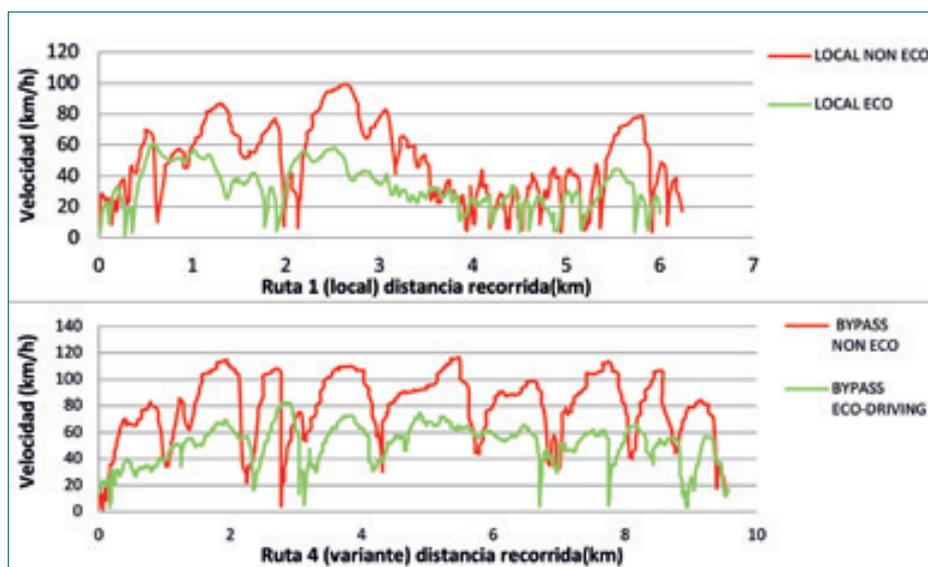


Figura 8. Diferencias entre la velocidad instantánea en dos rutas seleccionadas para los tipos de conducción.

	Vehículo	Km totales recorridos	Ruta 1 Local	Ruta 2 Colector	Ruta 3 Perimetral	Ruta 4 Variante	Total	Hombres	Mujeres
No eco	Astra	1.010	39	35	35	39	148	187	103
	Fiat	1.091	40	34	34	34	142		
Eco	Astra	1.022	41	32	34	38	145	190	100
	Fiat	1.045	37	35	37	36	145		
Total		4.168	157	136	140	147	580	377	203

Tabla 5. Distancia recorrida (km), número de viajes por ruta, tipo de vehículo y sexo del conductor.

Los ahorros obtenidos con la conducción eficiente se incluyen en la Figura 9.

La conducción eficiente siempre produce ahorros en comparación con la conducción convencional, y más en los vehículos diésel que en los de gasolina. La ruta 4 (variante) muestra la mayor disminución en el consumo, por lo que la conducción ecológica logra mejores resultados con rutas de mayor capacidad y donde se alcanzan mayores velocidades.

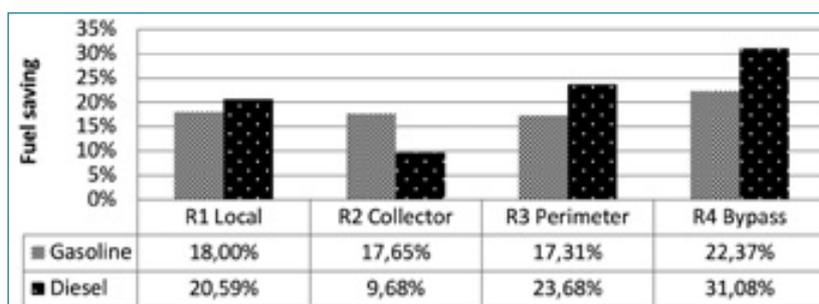


Figura 9. Ahorro de carburante entre ambos tipos de conducción por ruta y tipo de vehículo.

Por otro lado, la conducción ecológica provoca una disminución generalizada de las emisiones de CO₂ en todas las rutas. Las emisiones de CO₂ dependen directamente del consumo de combustible, por lo que la mayor disminución corresponde a la ruta 4 (variante) con un ahorro del 31% en diésel y el 22% en gasolina. La ruta que menos emisiones de CO₂ produce es la ruta 1 (local), ya que es la ruta de menor consumo de combustible. Por tanto, la ruta local puede considerarse como la ruta más ecológica de las cuatro probadas (eco-ruta). Esto implica que, en términos de emisiones de CO₂ y para ciudades pequeñas, cuanto más corto es el recorrido, mejores resultados se obtienen tanto en el estilo de conducción ecológico como en la conducción normal.

Por último, el análisis de las encuestas realizadas a los conductores indica que no hay una diferencia significativa en la dificultad de conducción antes y después de la formación en conducción eficiente. Esto implica que la técnica de conducción eficiente es fácil de aprend

der y practicar. El entorno de conducción tiene muy poca influencia, aunque algunos conductores reconocen tener más dificultades en condiciones peores de tráfico y meteorológicas. El 15% de los conductores considera que la conducción ecológica es menos entretenida y un 10% considera que provoca una disminución en la relajación de los conductores durante el viaje.

3.2. Experimento con conductores no profesionales en Madrid

Los datos básicos del experimento se incluyen en la Tabla 6.

La bibliografía confirma que la selección de vehículos es el factor que más contribuye al ahorro de combustible en comparación con la elección de la ruta y el estilo de conducción; un vehículo puede ser hasta nueve veces más eficiente en cuanto al consumo de combustible que otro (Sivak and Schoettle, 2012). Nuestro estudio

Sector	Variable	Promedio	Desv. Típica	Mínimo	Máximo
Conductores	Edad	31,7	11,7	23	56
	Años de experiencia	13	11,3	4	38
Experimento en carretera n = 3153	Distancia recorrida (km)	2,33	1,85	0,03	10,27
	Tiempo de viaje (s)	209	157	6	1.533
	Velocidad (km/h)	42,4	24,3	2,8	101,5
	Consumo de combustible (l/100 km)	5,71	1,06	3,98	15,66
	Emisiones CO ₂ (g/km)	183,2	33,7	24,2	550,6
Periodo 1 (no Eco) n = 1668	Distancia recorrida (km)	2,36	1,87	0,03	10,27
	Tiempo de viaje (s)	207	163	6	1.533
	Velocidad (km/h)	43,1	25,0	3,3	101,5
	Consumo de combustible (l/100 km)	5,91	1,24	4,03	12,66
	Emisiones CO ₂ (g/km)	189,4	34,6	69,2	550,6
Periodo 2 (Eco) n = 1485	Distancia recorrida (km)	2,30	1,83	0,09	6,88
	Tiempo de viaje (s)	210	150	15	1383
	Velocidad (km/h)	41,6	23,4	2,8	94,9
	Consumo de combustible (l/100 km)	5,53	0,78	3,97	10,21
	Emisiones CO ₂ (g/km)	177,4	33,1	24,2	480,2

Tabla 6. Estadísticas descriptivas de datos por sector



El estudio confirma que la conducción ecológica arroja mejores resultados en un coche de gasolina, con una reducción media del 7,6% en el consumo medio de combustible, que en un coche diésel, con una reducción del consumo del 4,7% de media.

utilizó dos vehículos diferentes que se alimentaban de combustibles diferentes pero con una segmentación similar (pequeña y mediana), ambos registrados bajo las normas Euro 5. Sin embargo, se obtuvieron mejores resultados con el coche de gasolina, logrando una reducción media del 7,6% en el consumo medio de combustible, en comparación con un promedio del 4,7% con el vehículo diésel. Por tipo de vía, los resultados se representan en la Figura 10.

La reducción media en el consumo de combustible que se logró a través de la conducción ecológica fue del 6,3%, lo que, por su relación lineal, conlleva la misma caída de las emisiones de CO₂. Como muestra la Figura 10, la reducción de combustible que se logró a través de la conducción ecológica varía según el tipo de carretera. Se observan mayores ahorros de combustible y reducción de emisiones a lo largo de las “mayor arterial” (8% de ahorro de combustible).

3.3. Eco-ruta en ciudades pequeñas

En este experimento lo que se analiza es el efecto del tipo de vía atravesada en el consumo de combustible. Todos los registros se refieren a una conducción normal de los conductores no profesionales (sin formación eco) en la ciudad de Cáceres. El número de paradas disminuyó con el nivel de servicio de la vía. Esto se debe a que las rutas urbanas tienen numerosos semáforos y pasos de peatones, mientras que la vía arterial (variante) solo tiene algunas intersecciones a nivel con glorietas. Además, las revoluciones por minuto (rpm) medias y máximas aumentaron con el nivel de

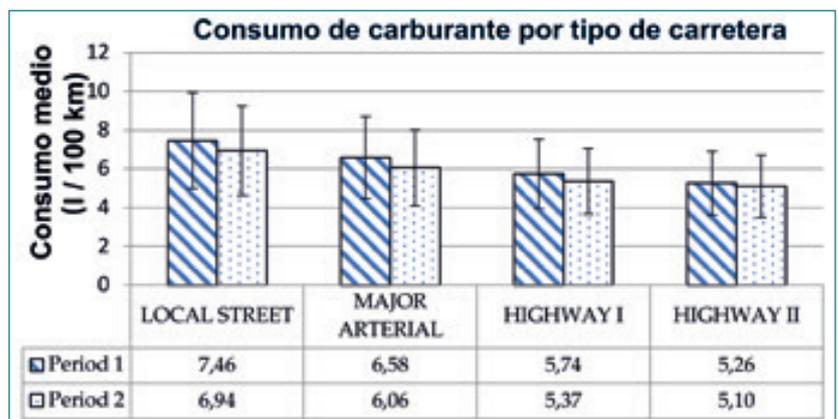


Figura 10. Consumo de combustible por tipo de carretera antes y después de la instrucción.

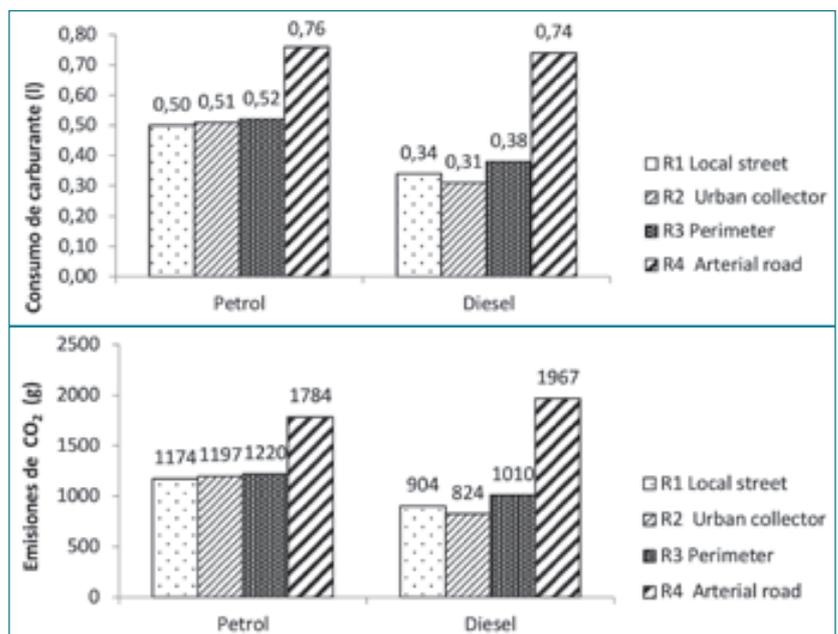


Figura 11. Consumo de carburante y emisiones de CO₂ para las diferentes rutas y vehículos.

servicio, así como las aceleraciones-deceleraciones medias y máximas. Esto puede explicarse por el hecho de que las velocidades de desplazamiento aumentan a medida que aumenta el nivel de servicio. En la Figura 11 se refieren los resultados de consumo y estimación de emisiones de CO₂.

Tipo de carretera	No eco (periodo 1)			Eco (periodo 2)		
	Diésel	Gasolina	Total km	Diésel	Gasolina	Total km
Local	1.592	1.802	3.394	1.698	1.616	3.314
Arterial	758	773	1.531	829	692	1.521
Total km por periodo	4.925			4.835		
Total km conducidos	9.760					

Tabla 7. Km recorridos por vehículo, tipo de carretera y periodo de conducción.

Esta figura indica una clara diferencia en el consumo y las emisiones de CO₂ en los recorridos urbanos (calle local, colector urbano y perimetral) con respecto a la circunvalación (vía arterial), ya que esta alcanza valores superiores en un 34% para el diésel. Además, el consumo en rutas urbanas fue un 27% menor en motores diésel que en gasolina. En la vía arterial (variante) el consumo fue similar para ambos motores.

3.4. Influencia del tamaño de una ciudad en la eficacia de la eco-conducción.

Se trata de una investigación que compara los resultados de las 2 ciudades (Madrid y Cáceres) para ver el efecto del tamaño de una ciudad en la conducción eficiente. Para ello se seleccionaron solo los tramos de ruta que eran comunes a ambas ciudades, es decir, las rutas locales y las arteriales. El cuadro resumen de los datos analizados se incluye en la Tabla 7.

Los 9.760 km recorridos se han distribuido de forma homogénea entre estilos de conducción eco y non eco. Sin embargo, este equilibrio no se mantiene en el tipo de carretera recorrida, ya que el 69% se ha hecho en calles locales y el 31% en arteriales. Esta diferencia se debe a que Madrid tiene una mayor proporción de autopistas urbanas que Cáceres, que es una ciudad pequeña, donde la mayoría de los itinerarios son locales. Para que la comparación sea correcta y no tenga sesgos, solo se han seleccionado los tramos de carretera que son comunes a ambas ciudades para comparar la eficacia de la conducción ecológica entre ambas. La Figura 12 muestra los perfiles de VSP promedio desglosados por ciudades y tipos de carreteras en el experimento (Jiménez-Palacios, 1998). Los conductores en ambas ciudades estuvieron la mayor parte del tiempo de conducción en los modos VSP 1-4.

La vía arterial principal de Cáceres muestra un comportamiento diferente al resto de vías, ya que no hay un pico marcado en el modo VSP 4 y hay mayores porcentajes de tiempo en los modos VSP altos (bandas 7-11). Esta diferencia se debe a los límites de velocidad en esta ruta. Las velocidades

máximas registradas son superiores al límite de velocidad de la vía (80 km / h).

La Figura 13 muestra el consumo medio de energía por kilómetro y la velocidad media para cada vía y tipo de ciudad.

En esta figura se constata que en las carreteras donde la velocidad media es mayor, se obtienen mejores resultados en el consumo medio de energía. Esto se debe a que una velocidad más baja significa más congestión y, por lo tanto, un mayor consumo de energía. La arteria principal de Cáceres presenta un alto porcentaje de tiempo (casi un 30%) en modo VSP 1, por lo que los valores

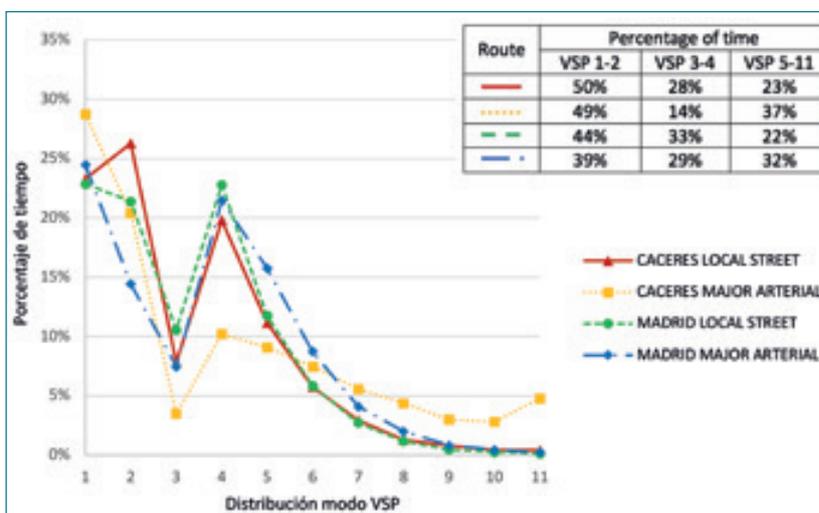


Figura 12. Distribución del modelo VSP para las diferentes rutas y ciudades seleccionadas.

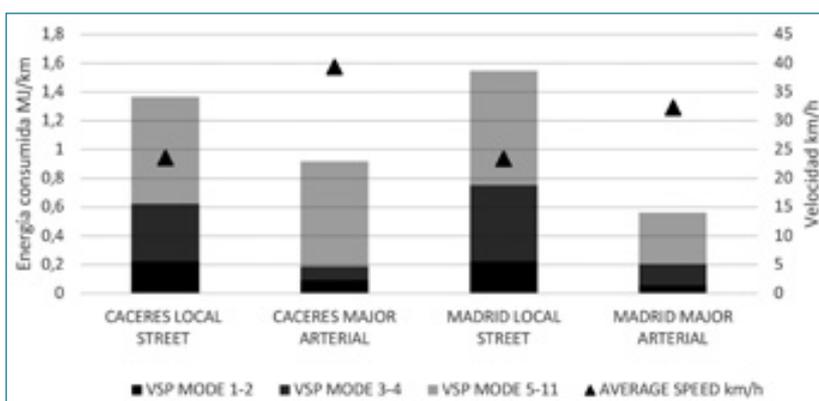


Figura 13. Consumo de energía medio (MJ/km) y velocidad media (km/h) para la ciudad y tipo de ruta.

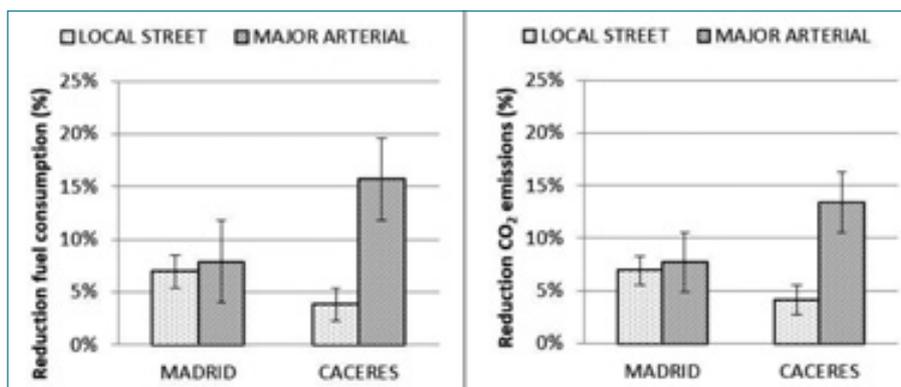


Figura 14. Impacto de la eco-conducción en el consumo de combustible y en las emisiones de CO₂.

	Modo conducción	Vehículo 1M	Vehículo 1T	Vehículo 2	Vehículo 3	Vehículo 4
Consumo (l/100km)	No Eco	6,71	6,16	6,15	8,93	5,99
	Eco	6,26	6,18	5,54	8,48	6,95
Ahorro en consumo (%)		6,6	-0,3	9,8	5,0	-16,0

Tabla 8. Consumos por conductor profesional y tipo de conducción.

medios finales obtenidos para el consumo energético son inferiores a los de las dos rutas locales de Madrid y Cáceres. Sin embargo, mostró un consumo de energía superior al registrado en la arteria principal de Madrid donde el límite de velocidad era de 50 km/h. Por lo tanto, desde una perspectiva de ahorro de energía, restringir la velocidad en carreteras de alta capacidad parece ser una medida eficaz.

Comparando ambas ciudades, el consumo y emisiones se reflejan en la Figura 14.

Madrid y Cáceres mostraron reducciones en el consumo y las emisiones de CO₂ para todo tipo de carreteras, obteniendo mayores ahorros en las vías de mayor capacidad. Los resultados indican que la conducción ecológica es menos eficaz con el aumento de la congestión urbana. Además, las calzadas dobles tienen muy buen comportamiento en términos de consumo de combustible y emisiones de CO₂ para las principales vías arteriales.

3.5. Experimento de conducción eficiente con conductores profesionales en Cáceres

Los resultados obtenidos se incluyen en la Tabla 8.

		Local	Colector			Perimetral		Variante		Interurbana
		Ruta 1	Ruta 2	Ruta 3	Ruta 4	Ruta 5	Ruta 6	Ruta 7	Ruta 8	
Consumo (l/100km)	No Eco	2,1	2,2	8,8	6,1	8,4	4,6	2,7	4,5	
	Eco	2,9	3,1	10,1	6,0	8,4	4,4	2,6	4,2	
Ahorro en consumo (%)		-41,3	-36,9	-14,4	1,6	0,0	3,8	0,8	7,4	

Tabla 9. Consumos por ruta y tipo de conducción.

La conducción eco de forma general produjo reducciones de la velocidad media, rpm y aceleraciones/deceleraciones, sin embargo, se redujeron muy poco los valores de consumo instantáneo, por lo que el consumo medio de l/100 km se aumentó con este tipo de conducción. Los conductores que ahorraron combustible registraron patrones de conducción muy similares a la conducción habitual, por tanto, no se puede afirmar que condujeran de forma eficiente.

Se hizo también un estudio por tipo de ruta para ver la influencia de esta en el consumo. En la Tabla 9 se representan los resultados obtenidos.

Las rutas en variante e interurbana son las que arrojan mejores resultados de ahorro de combustible, lo que indica que la capacidad de la vía mejora la eficacia de la conducción eficiente.

4. Discusión de los resultados obtenidos

El sector del transporte es el responsable del 20,3% del total de las emisiones de los gases de efecto invernadero en Europa. Por lo tanto, es clave fomentar una gestión eficiente de las carreteras, potenciando el uso de tecnologías que reduzcan la emisión de gases de efecto invernadero en las ciudades, implementando modos de conducción eficientes y decisiones de viaje que tiendan hacia la sostenibilidad. En esta investigación se ha analizado tanto el impacto de la conducción eficiente en una gran ciudad como Madrid, como el efecto en una ciudad pequeña como Cáceres, donde los flujos de tráfico no se ven afectados por las horas punta o por la congestión (Coloma et al., 2020).

Respecto a los resultados obtenidos del experimento en la ciudad de Madrid, se puede concluir que el ahorro de combustible obtenido es de hasta un 6,3%, independientemente del tipo de combustible y de la carretera, por lo que se puede afirmar que los cursos de formación de corta duración en conducción ecológica sí tienen efectos significativos en los hábitos de los conductores. Sin embargo, no se puede asegurar que estos efectos inmediatos persistan en el tiempo, ya que los conductores pueden volver, pasado el tiempo, a sus hábitos de conducción convencional. Los

Los resultados obtenidos se incluyen en la Tabla 8.

mayores ahorros de combustible se producen en las carreteras de circunvalación (8%). En vías locales con alta intensidad de tráfico, los conductores tienen más dificultades para aplicar las técnicas de conducción eficiente, ya que ésta depende en gran medida de causas externas que a menudo no se pueden controlar (Wang and Boggio-Marzet, 2018).

De los resultados obtenidos para ciudades pequeñas (Cáceres), se concluye que la conducción eficiente reduce la velocidad máxima de circulación y el número de paradas y aceleraciones en las distintas rutas, manteniéndose los valores de velocidad mucho más uniformes que en la conducción convencional, lo que lleva a una reducción del consumo de combustible de alrededor del 25% en variantes de población. Los ahorros son claramente mayores en rutas de circunvalación, ya que son más largas y menos dependientes de semáforos y pasos de peatones que las rutas urbanas. Estos ahorros relativos son más altos que los obtenidos en grandes ciudades, debido fundamentalmente a la menor congestión de las vías. Por el contrario, cuando el conductor está conduciendo de forma ecológica, el tiempo de viaje aumenta de media en un 7,5%. Las rutas de circunvalación son las más rápidas y tienen los niveles más altos de consumo y emisiones de CO₂, sin embargo, la conducción eficiente es más efectiva en estas rutas y produce el mayor ahorro de combustible y emisiones de CO₂ (Coloma et al., 2017).

La ruta más ecológica en ciudades pequeñas es la más corta, indicando esto que en ciudades pequeñas no congestionadas el principal parámetro para evaluar la ruta ecológica es la distancia recorrida y no el número de paradas o el tiempo empleado. En las ciudades pequeñas, eliminar los vehículos del centro de la ciudad mediante vías de circunvalación mejora la capacidad de servicio de las vías locales e implica reducir el tiempo de viaje por las mismas. Sin embargo, el tráfico por vías de circunvalación conlleva un mayor consumo de combustible y emisiones de CO₂, por lo que no es positivo desde un punto de vista estrictamente energético (Coloma et al., 2019).

Del análisis realizado en esta investigación respecto a las características del conductor y los resultados obtenidos en los distintos parámetros analizados para valorar la conducción eficiente, se concluye que se reducen los parámetros convencionales fundamentales de conducción de forma generalizada en todo tipo de conductores, pero se constata que esta reducción es más relevante en aquellos conductores que tienen una menor experiencia de conducción. Por tanto, sería conveniente establecer políticas de formación en conducción eficiente en las autoescuelas para implementar estas medidas en los conductores noveles, cuya capacidad de aprendizaje es mucho mayor que en conductores ya experimentados (García et al., 2018).

En la investigación se han analizado también los efectos de la implementación de la conducción ecológica en conductores profesionales de empresas de reparto de paquetería. Los resultados obtenidos constatan que la conducción eficiente en este tipo de

profesionales no supone, de forma generalizada, un ahorro de combustible medio por vehículo. El estrés del trabajador a la hora de realizar la entrega a tiempo en su jornada laboral y los hábitos de conducción previos ya adquiridos podrían ser los factores fundamentales para que los resultados en este tipo de conductores no hayan sido satisfactorios. Sin embargo, cuando los repartos se realizan por vías de mayor capacidad (interurbanas), el análisis de estos micro viajes refleja una tendencia al ahorro de combustible, concluyendo que siempre que sea posible realizar repartos por este tipo de vías, la conducción eficiente sí consigue ahorros en consumo de combustible (Coloma et al., 2021).

5. Conclusión

Los resultados de esta investigación muestran claramente que la gestión eficiente de una carretera pasa por gestionar su tráfico de tal forma que se reduzca el consumo de combustible y, consecuentemente, las emisiones de CO₂ emitidas. Con una conducción eficiente se obtienen estos objetivos, por lo que las autoridades competentes en gestión de tráfico de las carreteras deberían promover este tipo de conducción entre los ciudadanos, destacando sus efectos beneficiosos. Llevar a cabo acciones de sensibilización para promover la conducción ecológica y seleccionar rutas por las que se emitan menos gases contaminantes a la atmósfera, junto con reducir el acceso de automóviles y las plazas de aparcamiento en el centro de las ciudades, son acciones de gran potencial para alcanzar los objetivos de una ciudad sostenible.

Referencias bibliográficas

- I. Boriboonsomsin, K.; Barth, M.J.; Vu, A. Evaluation of driving behavior and attitude toward eco-driving. In Proceedings of the Transportation Research Board 90th Annual Meeting, Washington, DC, USA, 23–27 January 2011.
- II. Coloma, J. F., García, M., Wang, Y., & Monzón, A. Green Eco-driving effects in non-congested cities. *Sustainability*, 10(1), 28. 2017.
- III. Coloma, J. F., García, M., Wang, Y., & Monzón, A. Environmental Strategies for Selecting Eco-Routing in a Small City. *Atmosphere*, 10(8), 448. 2019.
- IV. Coloma, J. F., García, M., Boggio-Marzet, A., & Monzón, A. Developing Eco-Driving Strategies considering City Characteristics. *Journal of Advanced Transportation*, 2020.
- V. Coloma, J. F., García, M., Fernández, G., & Monzón, A. Environmental Effects of Eco-Driving on Courier Delivery. *Sustainability*, 13(3), 1415. 2021.
- VI. Díaz-Ramírez, J., Giraldo-Peralta, N., Flórez-Cerón, D., Rangel, V., Mejía-Argueta, C., Huertas, J. I., & Bernal, M. Eco-driving key

- factors that influence fuel consumption in heavy-truck fleets: A Colombian case. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 56, 258-270, 2017.
- VII. EEA, European Environment Agency, "Transport: increasing oil consumption and greenhouse gas emissions hamper EU progress towards environment and climate objectives", 2020. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/themes/transport/term/increasing-oil-consumption-and-ghg>
- VIII. Fiat, Eco-Drive. "Eco-Driving Uncovered—The Benefit and Challenges of Eco-Driving, Based on the First Study Using Real Journey Data. 2010". 2010.
- IX. García, M., Coloma, J. F., & Wang, Y. Eco-Driving In Small Cities. Driving Performance In Relation To Driver's Profile. *Transportation research procedia*, 33, 267-274. 2018.
- X. Henning, W. Ford-Eco-Driving—Best Practice Training & Evaluation, Improving Fuel Economy, Reducing CO₂. In *Proceedings of the Ecodriven Final Conference, Prague, Czech Republic, 12–13 November 2008*.
- XI. Jiménez-Palacios, J.L.. "Understanding and Quantifying Motor Vehicle Emissions with Vehicle Specific Power and TILDAS Remote Sensing". Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, Cambridge, MA, USA, 1998. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/3219/147b53fafde8d4cb816ecf307a1e3eb665d6.pdf>
- XII. Kobayashi, I., Tsubota, Y. and Kawashima, H. Eco-driving simulation: evaluation of eco-driving within a network using traffic simulation. *WIT Transport on the Built Environment*, Vol 96. 2007.
- XIII. Ma, H., Xie, H., Huang, D., & Xiong, S. Effects of driving style on the fuel consumption of city buses under different road conditions and vehicle masses. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 41, 205-216. 2015.
- XIV. Niu, Dening, and Jian Sun. "Eco-driving versus green wave speed guidance for signalized highway traffic: a multi-vehicle driving simulator study." *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 96: 1079-1090. 2013.
- XV. OECD, Organisation for Economic Cooperation and Development and International Transport Forum Working Group. "Greenhouse Gas Reduction Strategies in the Transport Sector". 2010. Disponible en: <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/10ghgtrends.pdf>
- XVI. Qian, Gongbin, and Edward Chung. "Evaluating effects of eco-driving at traffic intersections based on traffic micro-simulation." *Evaluating effects of eco-driving at traffic intersections based on traffic micro-simulation 1-11*. 2011.
- XVII. Rakha, Hesham A., Ismail Zohdy, and Raj K. Kamalanathsharma. "Agent-based game theory modeling for driverless vehicles at intersections." 2013.
- XVIII. Sivak, M., & Schoettle, B. Eco-driving: Strategic, tactical, and operational decisions of the driver that influence vehicle fuel economy. *Transport Policy*, 22, 96-99. 2012.
- XIX. UN, United Nations. "Climate Change Conference COP 25". 2019. Disponible en: <https://unfccc.int/cop25>
- XX. Wang, Y., & Boggio-Marzet, A. Evaluation of eco-driving training for fuel efficiency and emissions reduction according to road type. *Sustainability*, 10(11), 3891. 2018.
- XXI. Xia, H.; Boriboonsomsin, K. and Barth, M. "Dynamic eco-driving for signalized arterial corridors and its indirect network-wide energy/emissions benefits". *Journal of Intelligent Transportation Systems*, vol 17, no 1, pp. 31–41. 2013. ■



**acceso
al trabajo
completo**

Desarrollo y aplicación de tecnologías de avanzada para el estudio del comportamiento y mejora de métodos de diseño de pavimentos rígidos

Development and application of advanced technologies for the study of the performance and improvement of rigid pavement design methods

Eduardo TEJEDA PIUSSEAUT
Universidad Técnica de Manabí

Edwin Alexander RODRÍGUEZ VÉLEZ
Universidad Técnica de Manabí

Félix Michael HERNÁNDEZ LÓPEZ
Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE)

Carlos A. RECAREY MORFA
Universidad Central de La Villas (UCLV)

Marcio MUNIZ DE FARIAS
Universidad de Brasilia (UNB)

Miguel Ángel CELIGUETA JORDANA
Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería (CIMNE. UPC)

RESUMEN

Los pavimentos de hormigón de cemento portland, conocidos también como pavimentos rígidos, están formados por una losa de hormigón, reforzado o no, apoyada sobre el suelo natural de subrasante o sobre un material granular tratado con algún aglomerante.

Con el avance de la informática y de la investigación, los procedimientos de diseño empírico-mecanicistas han ido tomando auge en la ingeniería de pavimentos, permitiendo realizar el diseño con mayor fiabilidad, tanto en la evaluación de las variables de entrada como en la predicción del comportamiento de la estructura en el tiempo.

Y es que la instrumentación de pavimentos es un valioso procedimiento para monitorear el desempeño de estas estructuras in situ y una forma de cuantificar su respuesta ante las solicitaciones de cargas y del clima.

En este artículo, sus autores profundizan en el desarrollo y aplicación de tecnologías de avanzada para el estudio del comportamiento y mejora de métodos de diseño de pavimentos rígidos, en los que se producen diversos esfuerzos, causados por la acción de las cargas de los vehículos o por cambios de temperatura en la losa, que pueden provocar tensiones de combado o de fricción entre la losa y el soporte.

En los diseños o revisión de estas estructuras mediante procedimientos empírico-mecanicistas es necesaria la caracterización de los materiales componentes del sistema, donde la respuesta en tensiones, deformaciones y desplazamientos se utiliza, junto a los criterios de falla, para predecir los deterioros de acuerdo a la confiabilidad establecida para el diseño.

PALABRAS CLAVE: Pavimentos rígidos, Pavimentos de hormigón, Cemento portland, Ingeniería de pavimentos.

ABSTRACT

Concrete pavements with Portland cement, also known as rigid pavements, are formed by a concrete slab, reinforced or not, supported on the natural subgrade soil or on a granular material treated with some binder.

Thanks to the advances in computing and research, the empirical-mechanistic design procedures have become more popular in pavement engineering, ensuring a more reliable design, not only from the perspective of input variables, but also for the prediction of structure performance over time.

Pavement instrumentation is a valuable procedure to monitor the performance of these structures in situ, while also a way to quantify their response to load and weather conditionings.

In this article, the authors analyze the development and application of advanced technologies for the study of the performance and improvement of design methods for rigid pavements, considering different efforts, caused by the action of vehicle loads or by temperature changes in the slab; these can cause stresses between the slab and the support.

In the design or revision of these structures by means of empirical-mechanistic procedures, it is necessary to characterize the component materials of the system. The response of the system, in terms of tensions, deformation and displacements is used,

together with the failure criteria, to predict the deterioration of the structure, according to the reliability of the design process.

KEY WORDS: Rigid pavements, Concrete pavements, Portland cement, Pavement engineering.

1. Diseño y modelación computacional de pavimentos de cemento portland

1.1. Introducción

Los pavimentos de hormigón de cemento portland, conocidos también como pavimentos rígidos, están formados por una losa de hormigón, reforzado o no, apoyada sobre el suelo natural de subrasante o sobre un material granular que pudiera estar tratado con algún aglomerante.

Con el avance de la informática y de las investigaciones más recientes, los procedimientos de diseño empírico-mecanicistas han ido tomando auge en la ingeniería de pavimentos, permitiendo realizar el diseño con mayor fiabilidad, tanto en la evaluación de las variables de entrada como en la predicción del comportamiento de la estructura en el tiempo. La Guía 2008 MEPDG[®] (Guía de diseño empírico-mecanicista para el diseño de pavimentos), incluye los procedimientos para el análisis, diseño, reconstrucción y rehabilitación de pavimentos flexibles y rígidos, utilizando modelos de fallo de los deterioros fundamentales en este tipo de pavimentos: irregularidades (medidas con IRI), agrietamiento de losas y fallo en las juntas.

La instrumentación de pavimentos es un valioso procedimiento para monitorear el desempeño de estas estructuras in situ y una forma de cuantificar la respuesta de estas ante las sollicitaciones de cargas y del clima. Dentro de los parámetros que requieren mediciones de campo se encuentran: la deformación unitaria, los esfuerzos de tensión y compresión, la humedad y la temperatura. Las mediciones in situ de estos parámetros permiten el desarrollo de modelos de desempeño precisos y la calibración de los métodos de diseño de pavimentos desde un enfoque mecanicista⁽¹⁾.

En los pavimentos de hormigón simple de cemento portland, se producen diversos esfuerzos causados por la acción de las cargas de los vehículos o por cambios de temperatura en la losa, que pueden provocar tensiones de combado o de fricción entre la losa y el soporte. En los diseños o revisión de estas estructuras mediante procedimientos empírico-mecanicistas es necesaria la caracterización de los materiales componentes del sistema, donde la respuesta en tensiones, deformaciones y desplazamientos se utiliza, junto a los criterios de falla, para predecir los deterioros según la confiabilidad establecida para el diseño. Para la caracterización del hormigón se utiliza la resistencia a la flexión, obtenida en el ensayo de carga en vigas de dimensiones de 15 x 15 x 55 cm³, denominado Módulo de Rotura (MR), tras 28 días de curado.

1.2. Mecanismos de fallas en pavimentos de hormigón simple

Los deterioros en los pavimentos de hormigón simple son producidos por las tensiones, deformaciones y desplazamientos generados por el tráfico, la temperatura y la humedad en la cimentación. Se consideran dos diferentes mecanismos de fallo: la pérdida de soporte

por erosión, percibido con el escalonamiento en las juntas y el fallo por fatiga, con el agrietamiento transversal en las losas.

La pérdida de soporte por erosión se reduce aumentando la eficiencia de transferencia de cargas entre losas, manteniendo impermeable las juntas y utilizando bases granulares o tratadas. El agrietamiento transversal, causado por esfuerzos repetitivos en el borde y centro de la losa, se evalúa mediante la relación entre el número de repeticiones esperadas y las repeticiones admisibles en la losa.

1.3. Efectos de la diferencia de temperatura en la losa por la radiación solar

Las variaciones de temperatura del pavimento provocadas por los cambios de temperatura ambiente durante el día generan tensiones en las losas de hormigón y son causantes de ciertos deterioros; las variaciones uniformes de temperatura en la losa crean tensiones de fricción entre losa y cimiento, mientras que los gradientes de temperatura, a través de su espesor, producen las tensiones de combado.

Cuando se eleva la temperatura ambiente, la parte superior de la losa de hormigón se calienta más que la parte inferior y, como resultado, se produce un alargamiento de la parte superior respecto a la inferior (curvatura convexa), lo que crea un vacío debajo y en el medio de la losa. El peso propio de la losa evita que la curvatura real pueda desarrollarse, causando tensión de tracción en la parte inferior de la losa⁽²⁾. Durante la noche, la parte superior de la losa es comúnmente más fría que la parte inferior, y el resultado es una curvatura cóncava, lo que crea vacíos por debajo de la losa, que, combinados con la carga de tráfico, aumentan la tensión de tracción en la parte superior y pueden llevar a la iniciación de grietas de fatiga, de arriba hacia abajo⁽³⁾.

Las precipitaciones también pueden influir sobre la reducción de temperatura en la parte inferior de la losa, incrementando la humedad en los suelos de subrasante y en las capas no aglomeradas. En la magnitud de estas tensiones influyen las dimensiones de la losa (espesor, largo y ancho), los materiales, la temperatura ambiente y la humedad del cimiento.

1.4. Instrumentación y experimentación en pavimentos de hormigón simple

Debido a la variabilidad climática, de materiales y tráfico, es muy elevado el coste requerido para el desarrollo de los pavimentos de ensayos en tiempo real (RTL, por sus siglas en inglés), que abarque todas las variables involucradas por largos períodos, por lo que el desarrollo de procedimientos de diseño requiere del uso de ensayos acelerados en pavimentos (APT, por sus siglas en inglés).

La instrumentación de pavimentos se puede realizar de dos formas: en pistas de prueba con ensayos acelerados de carga mediante sistemas mecánicos, y en tramos de vía con tráfico real o con vehículos con carga controlada. Las mediciones en pavimentos son: deformaciones, esfuerzos y deflexiones. Las deformaciones para controlar el

daño por fatiga de los materiales y el ahuellamiento de bases granulares; los esfuerzos para identificar la influencia de las cargas sobre las diferentes capas y las deflexiones utilizadas en retrocálculos para cuantificar las propiedades in situ de los materiales⁽¹⁾.

Para la instrumentación en pavimentos es necesario, además de los sensores para obtener la señal de deformaciones y temperatura dentro del pavimento, la utilización de un sistema de adquisición de datos, que es la interfaz entre la señal y un PC. El hardware y software desarrollados específicamente para estos propósitos se presentan en forma de módulos que se conectan en los puertos de un PC (paralelo, serie, USB, etc.), o tarjetas conectadas a la placa madre. Se obtiene gran precisión y la posibilidad de medir deformaciones y temperatura, con un proceso centralizado de recolección de datos y su registro, facilitándose el análisis de datos y el procesamiento mediante un software.

1.5. Tecnologías de avanzada para la modelación micromecánica en pavimentos

El desarrollo de la mecánica computacional no ha sido ajeno al desarrollo de la modelación micromecánica de los hormigones de cemento portland o asfálticos. En este sentido, se pueden encaminar los estudios en dos direcciones generales para modelar el comportamiento tensión-deformación del hormigón (base cementicia o asfáltica) para pavimentos: la modelación continua (macroscópico) y un enfoque micromecánico (continuo o discreto). Los enfoques de modelación continua (macroscópico) combinados con las técnicas experimentales para calibrar y validar los modelos numéricos (que garantizan la fiabilidad de los modelos numéricos), se tratan en este trabajo. Este enfoque posibilita hacer readecuaciones al método de diseño de pavimentos rígidos de la PCA.

El futuro de la mecánica computacional de pavimentos flexibles y rígidos debe estar orientado al desarrollo de métodos de diseño empírico-mecanicistas, donde se combinen técnicas de modelación

micromecánica (continuas o discretas) con técnicas experimentales para lograr esta finalidad. Esta combinación garantiza un acercamiento a la naturaleza discreta y micromecánica de los hormigones, su naturaleza estocástica, modelación multi-escala a nivel de detalle morfológico y disminución de los costes de investigación, lo que conduce al desarrollo de nuevos métodos de diseño o al perfeccionamiento de los existentes, evidenciando la necesidad de desarrollar tecnologías de avanzada para su modelación.

2. Modelo experimental de un pavimento de hormigón ante los efectos de carga y la temperatura

El empleo simultaneo de la experimentación y la modelación computacional forman un complemento de gran utilidad para replicar, de forma fiable, la respuesta de las estructuras ante diferentes modificaciones de las variables independientes involucradas. Se desarrolló un trabajo experimental en un tramo de pavimento formado por cuatro losas de hormigón, concebido como modelo físico para evaluar las deformaciones debido a las cargas impuestas y las variaciones de temperatura en la losa.

2.1. Modelo experimental

El tramo experimental se compone de cuatro losas de hormigón, ocupando una superficie total de 325 m². Las losas, con espesor de 25 cm, se dividen en dos secciones, una parte sobre la subrasante compactada, conformada por el suelo del lugar, y otra sobre un material de subbase de 25 cm de espesor. Las características geométricas del tramo y su ubicación se muestran en la Figura 1.

En uno de los laterales de las losas se colocó arcén de hormigón, para considerar su influencia en las tensiones. Además, se concibió una de las juntas transversales con el uso de pasadores y la otra con trabazón de agregados para evaluar la influencia de la forma de transferencia de cargas.

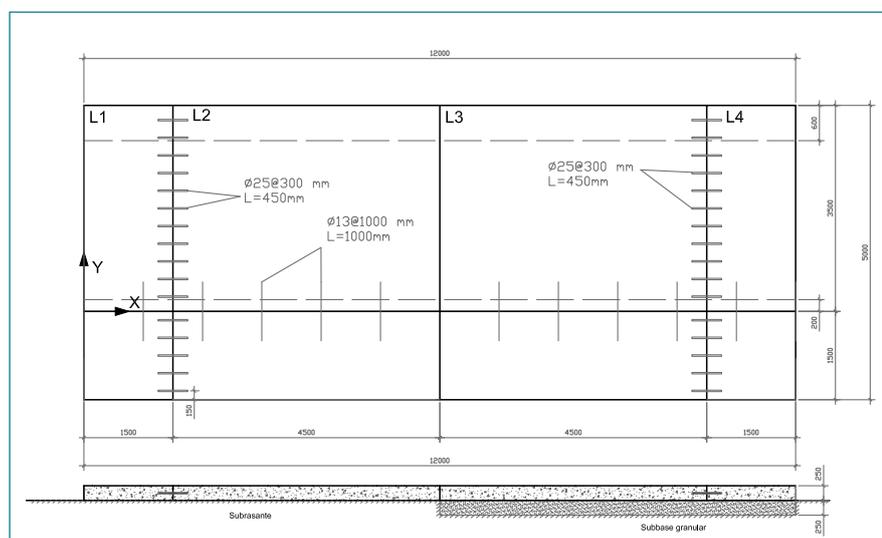


Figura 1 Esquema de distribución y características geométricas del tramo experimental.

2.2. Preparación del cimiento

Se realizaron los ensayos típicos en el laboratorio, cuyos resultados se muestran en la Tabla 1, para el suelo natural y para el material de subbase. El suelo del lugar clasifica como A-7-6, con bajo valor de CBR (3,9%) y elevada plasticidad. La subbase es un material triturado de cantera, de buena calidad como subbases (CBR=61,0%) e Índice Plástico superior al 6%.

La subbase se colocó en un espesor de 25cm, compactada hasta el 100% de la densidad Proctor Modificado. Mediante ensayo con placa de carga se obtuvo el Módulo de Reacción (k) y el Módulo de Elasticidad (E) para la subrasante natural y subbase (Tabla 1).

2.3. Construcción de las losas de hormigón

Las losas de hormigón se construyeron en dos etapas, primero los carriles y después el arcén de hormigón, en uno de los laterales, utilizando moldes de acero para el encofrado. Los pasadores con dimensiones de 25,4 mm de diámetro y 45 cm de largo; mientras que las barras de amarre de 12 mm de diámetro y 90 cm de largo. Antes del hormigonado, se colocaron los sensores de deformación y de temperatura, en las posiciones previstas, embebidos dentro del hormigón o en la superficie. La Figura 2 permite apreciar el proceso de hormigonado.

El hormigón se elaboró para una resistencia de 35MPa a los 28 días de curado, tomándose muestras cilíndricas para la resistencia a compresión y prismáticos para el Módulo de Rotura, ensayándolas a 7, 14 y 28 días de curado. La resistencia a compresión del hormigón registró valores superiores a los requeridos y elevados valores del módulo de rotura, desde los primeros días, utilizando en el curado dispersores de agua y mantas plásticas.

2.4. Instrumentación de las losas de hormigón

La instrumentación fue concebida con dos sensores diferentes: medidores de deformación y de temperatura. Los medidores de deformación son galgas extensométricas (*strain gauge*) con módulo de deformación similar al hormigón (35MPa) y resistencia nominal igual a 120 Ω . Algunas colocadas embebidas en el hormigón, con un factor galga de 2,16, y otras en la superficie con factor galga de 2,23. Los medidores de temperatura son termo-resistencias del tipo PT-100, un tipo específico de detector de temperatura RTD (Detector de Temperatura por Resistencia). Los elementos PT-100 están fabricados con Platino, con una resistencia eléctrica de 100 Ω a temperatura de 0 $^{\circ}\text{C}$. La ubicación de los sensores en la losa se planificó mediante



Figura 2. Proceso de hormigonado de las losas.

Ensayos	Norma	Subrasante	Subbase
Límite líquido	ASTM D4318	44.1	38.9
Índice de plasticidad (%)	ASTM D4318	16.9	8.7
Clasificación	AASTHO	A-7-6	A-2-4
Máxima densidad seca (kg/m^3)	ASTM D1557	1382	1860
Humedad óptima P.M (%)		28.78	15.2
CBR (%)	ASTM D1883	3.9	61
Módulo de reacción de suelo (MPa/m) k	ASTM-D-1194	27	61
Módulo resiliente estimado (MPa) Mr		129	262

Tabla 1. Resumen de la caracterización del suelo de subrasante y de la subbase.

modelación, con el software EverFE, de manera que quedaran en las posiciones críticas de las cargas; a cinco profundidades en la losa, para obtener el perfil de la temperatura. Las termo-resistencias se instalaron próximas a sensores de deformación.

Para la adquisición de los datos, se empleó un sistema de adquisición modular de *Nationals Instruments* NI cDAQ-9174, con 6 puertos intercambiables. Se conectó el sistema con el adquisidor, midiéndose, tras el hormigonado, la resistencia nominal con un multímetro de doble precisión, para comprobar la funcionalidad de todos los instrumentos. Se emplearon tres módulos para las mediciones:

- Un módulo NI 9235 con 8 canales de medio puente para los *strain gauge*.
- Dos módulos NI 9219 de 4 canales de uso múltiple (todas las variantes del puente de wheatstone) para instalar 6 sensores de temperatura (5 en la losa y uno para la temperatura ambiente).

Para el ordenamiento de los datos se usaron interfaces programadas en Labview 2017, que controlan las mediciones y generan

El empleo simultáneo de la experimentación y la modelación computacional forma un complemento de gran utilidad para replicar, de manera fiable, la respuesta de las estructuras ante diferentes modificaciones.

reportes en cada caso de estudio. Los estudios comprendieron cuatro fases:

- Medición de las variaciones de la temperatura en la losa durante el día.
- Estudio de las tensiones de combado, producidas por los gradientes térmicos registrados en la losa durante el día.
- Estudio de las tensiones por carga de tráfico.
- Estudio de los estados críticos de tensiones (tensiones de combado + tensiones por cargas).

2.5. Resultados de las mediciones de temperatura y esfuerzo de combado en la losa

Las mediciones de temperatura se realizaron durante 24 horas seguidas, en diferentes días de la semana, y durante los meses de mayo a junio. Se registraron las temperaturas a diferentes profundidades de la losa, así como la temperatura ambiente, siguiendo los trabajos de Balbo & Severi^(L) (ver Figura 3).

En la Figura 4 se muestra el patrón diario de temperatura en la losa durante el día, obtenido a diferentes profundidades (puntos 1 al 5 de la Figura 3), además de la temperatura ambiente. Hasta las ocho de la mañana no se registraron diferencias apreciables en la temperatura ambiente, pero se incrementa significativamente (30,7 °C) cerca de las dos de la tarde. Luego desciende de nuevo aproximadamente hasta las siete de la tarde a 24,7 °C, y después de las diez de la noche hasta 23,4 °C, para alcanzar de nuevo la temperatura de la madrugada.

El patrón de temperatura se repite entre los meses de mayo a junio, con valores máximos por encima de 30 °C entre la una y dos de la

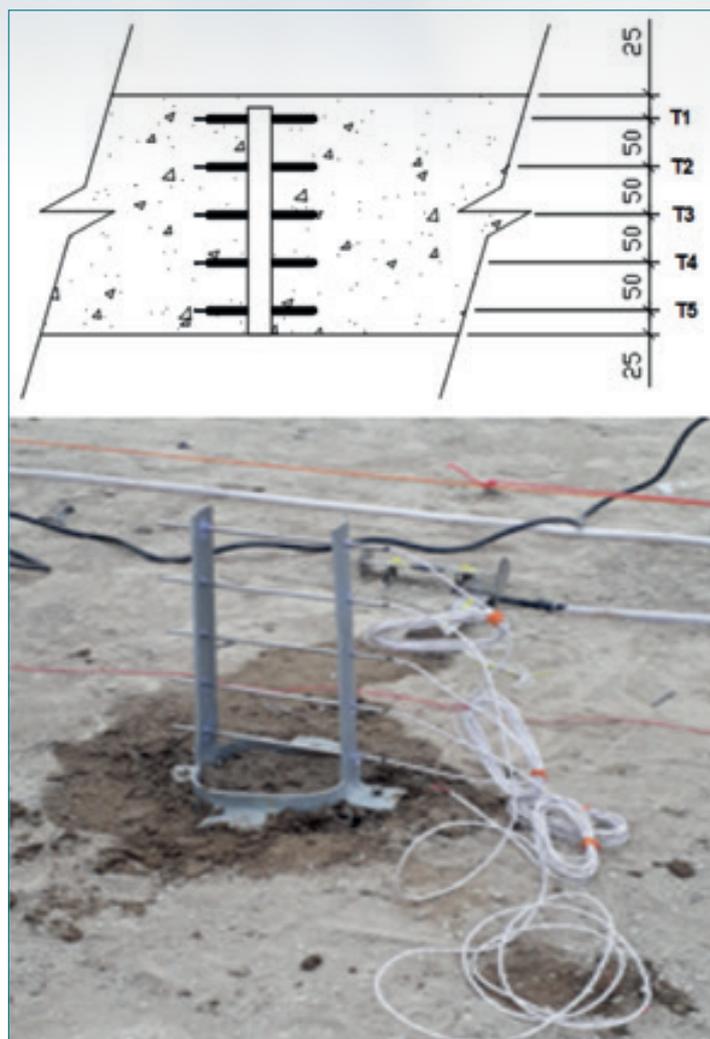


Figura 3. Posición de los sensores en el espesor de la losa.

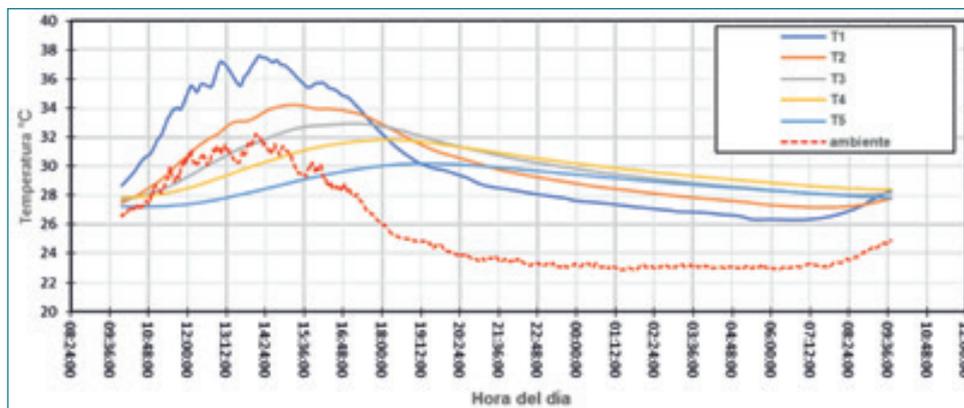


Figura 4. Temperatura de la losa de hormigón durante las horas del día, a diferentes profundidades en un día típico entre los meses de mayo a junio.

tarde, y valores mínimos en la madrugada. Se observa una evidente relación entre la temperatura ambiente y la del punto 1, localizado a dos centímetros de la superficie; el resto de las mediciones van a depender de la transferencia de temperatura a través del espesor y de la influencia de la humedad en el cemento.

Entre las diez y las once de la mañana se igualan las temperaturas en la superficie y el fondo, y también entre las nueve y las diez de la noche, donde no deben crearse tensiones de combado, ya que el gradiente es igual a cero, aunque pueden existir tensiones de fricción entre losa y cemento. Este lapso de tiempo permitirá descartar la influencia del gradiente de temperatura al evaluar la influencia de una carga impuesta.

El mayor gradiente de temperatura (11 °C) se obtuvo entre la una y las dos de la tarde, cuando la superficie se encontraba a 39,5 °C y en el fondo a 28,5 °C. En este intervalo se deben presentar las mayores tensiones por combado de la losa. Por el contrario, las tensiones de combado debido a la diferencia de temperatura negativa (nocturno), son muy bajas, ya que cuando la temperatura de la losa en el fondo es mayor (30,9 °C), la diferencia entre el fondo y la superficie es de solo 15 °C.

La Figura 5 representa el perfil de temperatura durante el día, a diferentes profundidades. Además del ambiente, las variaciones de temperatura en la losa durante el día dependen del espesor y de la humedad de la base. La mayor temperatura en la superficie fue de 39,5 °C, con temperatura ambiente de 30,7 °C y en el fondo de 28,2 °C. La temperatura en el fondo de la losa, a 18 cm, no presentó grandes cambios, manteniéndose entre 28,2 °C y 30,9 °C (diferencia de 2,7 °C), lo que evidencia la influencia de las condiciones de humedad en el cemento y la menor influencia del ambiente.

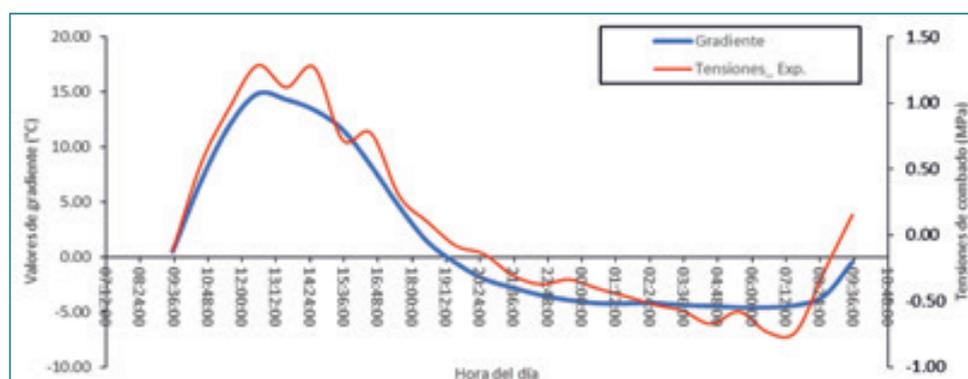


Figura 5. Gradientes térmicos y tensiones de combado en la losa de hormigón durante las distintas horas del día.

2.6. Estado tensional debido a los gradientes de temperatura

Para evaluar las tensiones de combado se registraron los gradientes y las deformaciones en un sensor próximo al punto de medición de las temperaturas (coordenadas 3623,2500,20 mm), luego, aplicando la Ley de Hook generalizada, se determinaron las tensiones de combado. La Figura 5 representa las variaciones del gradiente y de las tensiones de combado originadas.

2.7. Determinación del estado tensional debido a las cargas impuestas

El estudio de las cargas se desarrolló evaluando las tensiones producidas por la carga de un camión, realizando las mediciones en el lapso de tiempo donde el gradiente es nulo (10-11 am) para minimizar las tensiones por combado. Se evaluaron dos casos: en uno, moviendo el vehículo a 60 cm del borde libre de la losa, y en el otro, por el lado que tiene el arcén de hormigón. El camión con una tara de 7,6 Ton fue cargado con 11,3 Ton de un material granular. Para considerar el estudio cuasi estático, se empleó una velocidad de 5 km/h. El paso por la losa del vehículo cargado permitió medir las deformaciones en las galgas extensométricas colocadas en la superficie y fondo de la losa. En la Figura 6 se muestran algunos de los resultados de las tensiones obtenidas en la losa durante el día.

3. Modelación macro-mecánica del pavimento de hormigón

En la modelación se creó un modelo en 3D del sistema de pavimento, conformado con las dos losas apoyadas sobre un continuo elástico, con el que se puede determinar las tensiones generadas en la losa por el eje trasero del camión. Se empleó el Método de los Elementos Finitos (MEF) para la modelación macro-mecánica del pavimento de hormigón,

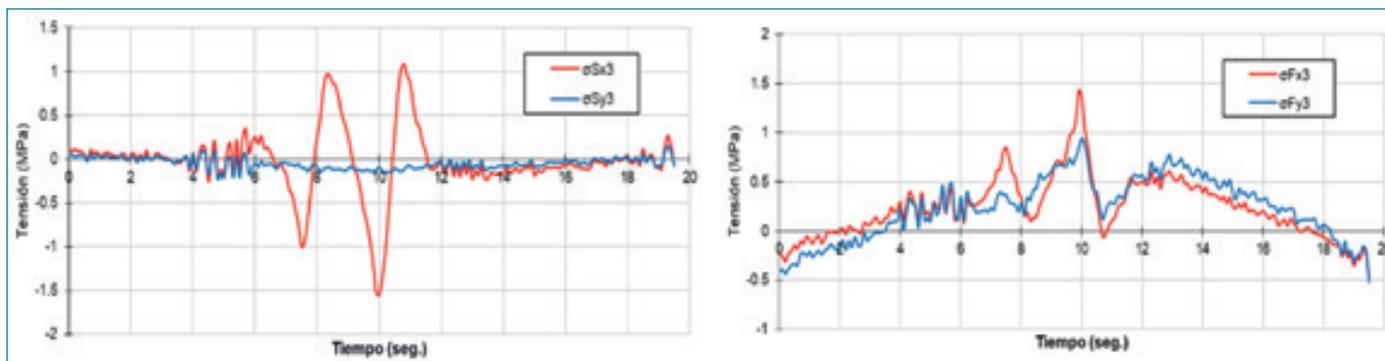


Figura 6. Tensiones calculadas en la superficie y fondo de la losa durante el día (Caso 1).

utilizando EverFE 2.25, que es el software de propósito específico para el cálculo de las tensiones. El software multipropósitos ABAQUS/CAE, 2014 se emplea para la determinación del módulo de conjunto del cimientado formado por la subrasante y la subbase, además para la reproducción numérica en 3D del ensayo de módulo de rotura.

3.1. Modelación numérica de las tensiones en el pavimento

El software EverFE 2.24 es una herramienta para el análisis de elementos finitos que simula la respuesta de las estructuras de los pavimentos de hormigón simple ante las cargas de tráfico y de temperatura. Se ha utilizado en diferentes investigaciones y validado por varios autores.

Geometría del modelo: La geometría del modelo se compone de dos losas con ancho de carril de 3,50 m y de 1,50 y 4,50 m de largo, con espesor de 0,25 m; tienen un borde libre y el otro con arcén de hormigón de 1,50 m. Las losas tienen pasadores de 450 mm de longitud y 25 mm de diámetro, espaciados a 300 mm, mientras que las juntas longitudinales son barras lisas de 1000 mm de longitud, 13 mm de diámetro y espaciados a 900 mm.

Modelo de materiales: El modelo constitutivo del EverFE, está implementado como medio lineal, elástico e isótropo. Las características de los materiales se muestran en la Tabla 2. En el cimientado se utiliza el modelo discreto de Winkler, con módulo de reacción (k) y el coeficiente de dilatación térmica del hormigón para evaluar el efecto de la temperatura.

El hormigón fue caracterizado con una Densidad (γ_c) de 2400 kg/m³, Módulo de elasticidad (E) de 27800 MPa y Coeficiente de dilatación térmica de $1,1 \times 10^{-5}$. En la subbase el Módulo de elasticidad (E) es de 120 MPa y la Densidad seca de 1800 kg/m³. El Coeficiente de Poisson (ν) para la subrasante y hormigón fue, respectivamente, de 0,35 y 0,17.

Modelo de cargas: la modelación se realiza en dos partes. Primero, considerando el efecto del gradiente térmico, y segundo, la aplicación de una carga de 135 kN causada por un eje simple con ruedas duales, con una presión de contacto de 0,7 MPa.

Modelo de las condiciones de borde: Las condiciones de contorno proporcionadas por EverFE son las mínimas requeridas para evitar el movimiento de cuerpos rígidos. El sistema se apoya sobre infinitos soportes elásticos (base Winkler), incorporados por el software bajo la última capa del modelo.

3.1.1. Calibración y validación de los resultados

La calibración matemática garantiza la aproximación adecuada y estabilidad de la solución obtenida, mientras que la calibración física garantiza que el modelo tenga correspondencia con el fenómeno físico estudiado. Los resultados del tramo experimental se usaron como modelo físico en la modelación, comparándose el modelo numérico con los resultados del experimento realizado en el tramo.

Se realizó un proceso de selección de la densidad de malla, variando el tamaño del elemento y considerando las recomendaciones sobre la relación de aspecto^(M, V). El tamaño del elemento se hizo variar desde 50 a 300 mm, y como variable de control la tensión en la fibra más traccionada en el borde de la losa, observando el tiempo de cálculo y el consumo de memoria de cada una de las variantes. Se observó en la horizontal que al variar la malla con máxima densidad en la vertical, se reduce el error hasta un punto donde casi no varía, con un error menor del 3% respecto al valor patrón, lo que confirma los criterios de Zienkiewicz & R.L Taylor^(M). Al final se seleccionó un tamaño de malla de 25 cm.

3.1.2. Validación de las tensiones de combado

Los cambios de temperatura se convierten en predeformaciones de elementos equivalentes a través del coeficiente de expansión térmica de la losa, y estas deformaciones se integran numéricamente sobre el volumen del elemento para generar fuerzas nodales equivalentes^(M). Para validar las tensiones de combado en la losa se replicó la sección del experimento donde están colocados los sensores; sin colocar carga vehicular. Se variaron los gradientes según las mediciones horarias de temperatura, determinándose las tensiones de combado en las coordenadas del punto de medición (3623;2500;20).

Las tensiones calculadas mediante la modelación numérica presentaron valores similares a las mediciones del experimento, con un error medio cuadrático porcentual del 18,7%, resultado que

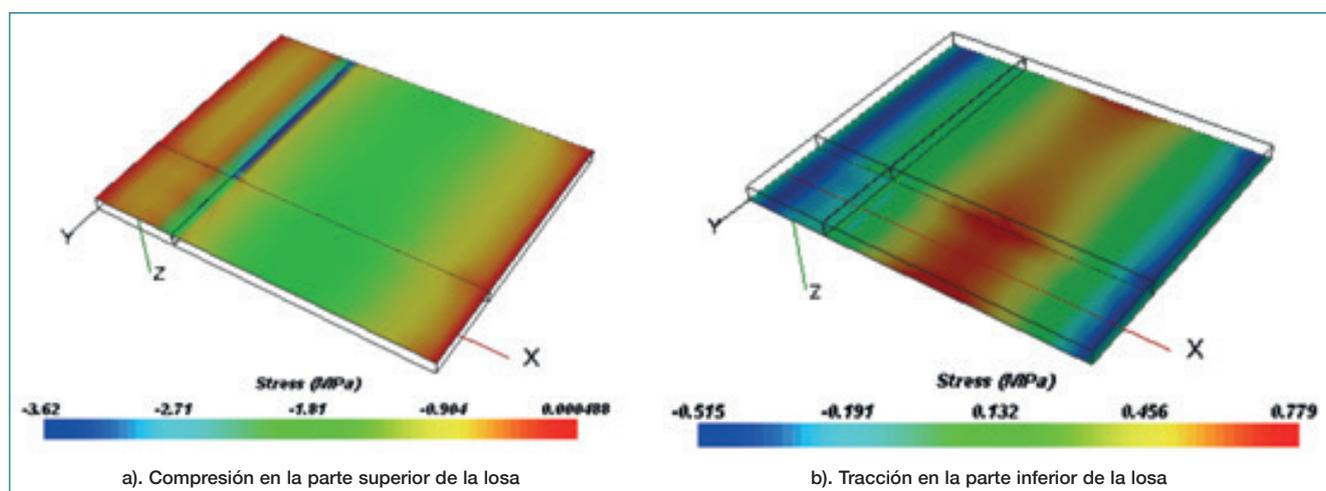


Figura 7. Tensiones en la losa de hormigón por efecto del gradiente máximo de temperatura.

se consideró adecuado. La Figura 7 muestra las tensiones que se crean debido al gradiente máximo, cuando existe una temperatura de 39,5 °C en la superficie de la losa y 28,5 °C en la parte inferior.

3.1.3. Validación de las tensiones por carga

Para la validación de las tensiones producidas solo por la carga, se coloca en el modelo numérico propuesto la carga del eje trasero del vehículo empleado en el experimento. Se realizaron las simulaciones para los dos casos de estudio (sin arcén y con arcén de hormigón), analizándose los valores de tensión en las coordenadas donde están ubicados los sensores. Los errores obtenidos en el modelo numérico en ambos casos de estudio son cercanos al 10%, lo que puede considerarse un buen resultado desde el punto de vista de aproximación.

3.2. Módulo del conjunto en el cemento aplicando un modelo axial-simétrico

La herramienta numérica empleada en este estudio es el programa computacional ABAQUS/CAE, 2014. Como antecedentes de su aplicación en el campo de los pavimentos rígidos, se puede ejemplificar su uso en los trabajos de varios autores^(VII, VIII, IX, X, XI, XII). Se utilizó para modelar el ensayo con placa de carga, con el fin de obtener el módulo resiliente en la superficie producto de los dos materiales componentes del cemento, la subrasante y la subbase.

Para el modelo se emplea un modelo axial-simétrico con eje de simetría en el centro de la placa, construido de acuerdo a la teoría de capas elásticas de Burmister (1945) siguiendo los criterios del modelo bicapa con placa rígida de carga. El dominio es un semiespacio axial-simétrico de dos capas; la superior correspondiente a una subbase de 20 cm de espesor y la inferior de espesor infinito.

La carga se aplicó sobre una placa rígida, donde la distribución de presiones no es uniforme y tiende al infinito al acercarse al borde, lo que se demuestra en la distribución de presiones obtenida por Ullidtz^(XIII) también en el libro de Huang^(XIV). La carga se colocó en un punto ubicado en el centro de la placa, aumentándose con

incrementos del 10% del total, hasta llegar al 100% de la carga (0,7 MPa), aproximadamente, donde se realizan las mediciones del desplazamiento en dicho punto.

En modelo constitutivo de los materiales es lineal elástico, definido por el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson (ν), estimados para la subrasante y subbase a partir de trabajos realizados por Papagiannakis & Masad, 2008^(XV). En la validación del modelo las propiedades se establecieron según los materiales del tramo experimental.

La geometría del dominio es discretizada con elementos isoparamétricos de 4 nodos y formulación axial simétrica (ABAQUS, 2013), con mayor densidad de malla en la zona de interés, según criterios de otros autores^(LXVI, LXVII) sobre condiciones del mallado para evitar errores de convergencia. Se varió la densidad de malla sin modificar el tipo de elemento o esquema de integración. Se probaron 10 densidades en la zona de interés, desde una malla gruesa (100 mm) hasta una muy densa (10 mm); en cada caso la variable respuesta (desplazamiento en el nodo de control), se contrastó con la solución analítica de Burmister, para sistema bicapa con placa rígida ilustrado en el libro de Huang^(XVIII). Se seleccionó la densidad de malla del modelo MEF-4 (40 mm), con buena aproximación y mínimo costo computacional.

3.3. Modelación numérica del ensayo de módulo de rotura (MR) del hormigón

El módulo de rotura del hormigón es uno de los parámetros condicionantes en el comportamiento a fatiga de los pavimentos, este se obtiene a través de ensayar a flexión una viga isostática con carga a un medio o a un tercio de la luz (ASTM C78:02). Los resultados del ensayo con carga a un tercio de la luz son los más usados para el diseño de pavimentos.

Modelo geométrico: Las dimensiones de los elementos empleados en el estudio se tomaron en función de unos experimentos realizados en la Universidad de São Pablo (USP), los cuales se emplearon en el proceso de calibración y validación del experimento

numérico. Los detalles del experimento se encuentran en el trabajo desarrollado por Cervo^(xvi).

Modelo de cargas y condiciones de contorno: La carga en el modelo se corresponde con las consideraciones de la norma (cargas puntuales a un 1/3 de la luz). Se incrementa progresivamente hasta la rotura del material. Las condiciones de contorno representan físicamente el experimento.

Modelación del hormigón: En la modelación se lleva el hormigón hasta el fallo, por eso en la etapa no lineal ha sido utilizado el Modelo de Daño Plástico^(iv, xvii, xviii, xix). Modelo que se encuentra implementado en el código ABAQUS/CAE^(xx), que considera los fenómenos más importantes del hormigón basados en los principios teóricos del Modelo de Mohr-Coulomb Modificado.

3.3.1. Calibración matemática

Se hizo estudio para la selección del tipo de elemento finito y, al mismo tiempo, la densidad de malla más conveniente, capaz de representar con la mayor aproximación el verdadero comportamiento físico de la estructura, para lo cual se realizó un diseño multifactorial, variando indistintamente cinco densidades de mallas con los tres tipos de elementos finitos. Se tomó la carga de rotura obtenida en el ensayo experimental y las de diferentes configuraciones, verificando los resultados en el punto de control. El elemento C3D4, como se plantea en otros trabajos^(vi), es el que más rápido converge a la solución, pero genera un número elevado de elementos, con costo computacional también elevado.

3.3.2. Calibración física y validación de los resultados

En el experimento (V-I) y (V-II) de Cervo^(xvi) no se contó con una caracterización completa del comportamiento del hormigón, pero se tienen datos de la variabilidad del mismo, empleados también en una pista de ensayo de la Universidad de São Paulo^(xxi). Los resultados de la resistencia media a compresión fueron de 33,15 MPa, con un coeficiente de variación del 15%, lo que estadísticamente representa una desviación de 4,97MPa.

Partiendo de estos datos, se calibró el modelo constitutivo elasto-plástico a partir de generar curvas de daño plástico con el valor medio y los extremos del intervalo de la resistencia a compresión del hormigón y con ello determinar la tensión de rotura como variable respuesta. Con los resultados, mediante un análisis inverso se estima la posible resistencia a compresión del experimento y, con ello, construir las posibles curvas que describen su comportamiento en la etapa elasto-plástica. Se obtuvo del ajuste una ecuación cuadrática que permite con el valor de módulo de rotura del experimento (V-I) (4,8 MPa) obtener como resultado el intervalo de confianza de la resistencia a compresión.

$$M_x = 0.0027(f'c)^2 - 0.1312(f'c) + 5.9896 = 4.8MPa \quad \text{solución} \rightarrow \begin{pmatrix} 36.5322MPa \\ 12.0604MPa \end{pmatrix}$$

Los valores calibrados ofrecen errores en el orden del 5%, por lo cual se valida el modelo numérico para representar el ensayo de la investigación.

4. Análisis paramétrico para la determinación del número de ejes admisibles por fatiga de la losa de hormigón

El procedimiento de diseño propuesto se basa en calcular la sumatoria de daño que producen las sollicitaciones consumidoras del potencial de fatiga en la losa, durante un periodo de tiempo determinado^(xxii). El porcentaje de fatiga de cada sollicitación se calcula como la relación entre las repeticiones esperadas y las admisibles.

El número de repeticiones admisibles en la losa es dependiente de la relación entre la tensión de trabajo de la losa de hormigón y de su resistencia a flexo-tracción. En la tensión de trabajo (σ) de la losa se influye la carga que recibe, su geometría y los materiales que componen el sistema. Se incluye en el procedimiento cómo estimar el aporte de resistencia que se obtiene con el uso de subbase granular y la confiabilidad como variable en el diseño, a través de un modelo matemático probabilístico.

4.1. Geometría del modelo

En la geometría se tuvieron en cuenta el espesor y la rectangularidad de las losas. El espesor varía entre 120 y 200 mm. La rectangularidad se estable como la relación entre el largo y el ancho de losa. En un estudio factorial se varió el ancho de carril desde 3,0 a 3,75 m y la longitud de la losa de 3 a 6 m, obteniéndose en cada caso las tensiones de tracción en el punto crítico. Las condiciones invariantes del experimento fueron: Resistencia a compresión del hormigón ($f'c=30$ MPa), Espesor de losa de 200 mm, Módulo resiliente del cemento $E = 50$ MPa y carga por eje simple de 100 kN con presión de contacto de 0,7MPa.

4.1.1. Materiales del sistema

Resistencia a compresión del hormigón hidráulico

En una prueba de significancia, la resistencia a compresión a los 28 días presentó un p-valor mayor a 0,05, por lo que no es estadísticamente significativo, para un nivel de confianza del 95,0%. Se tomó como resistencia a compresión ($f'c$) a los 28 días un valor fijo de 30MPa ($E=26000$ MPa, $\nu=0,17$).

Calidad del cemento

El Módulo Resiliente en el cemento del pavimento de hormigón se encuentra entre 50-800MPa, si se considera la utilización de material de subbase o de base. En las pruebas se comprobó que, a calidades altas del cemento (por encima de 350 MPa), se observa que este influye poco en las tensiones, corroborando lo referido por autores e instituciones (AS3600^(xxiii), Austroads^(xxiiii), León^(xxv), Yoder & Witczak^(xxvi)).

Empleo de subbase granular no aglomerada

La calidad del suelo de subrasante se varió desde 20 hasta 160MPa (CBR de 2-16%) y para la subbase se emplearon calidades entre 160 y 500MPa (CBR de 16-50%). Los espesores de subbase utilizados son de 15, 20, 25 y 30cm. Los módulos y coeficientes

de Poisson se han tomado de la AASHTO15. El modelo obtenido responde a la siguiente ecuación matemática:

$$E_{\text{superficie}} = 34.2483 + 1.24472 \cdot E_{\text{gr}} + 0.121038 \cdot E_{\text{sb}} + 0.122114 \cdot h_{\text{sb}} \quad (0.1)$$

Donde las variables independientes son: los módulos de la subrasante (E_{gr}) y de subbase (E_{sb}) y el espesor de subbase (h_{sb}). Se obtuvo un coeficiente de determinación R-cuadrado de 98,2%, donde el p-valor es menor que 0,05, por lo que los parámetros del modelo son estadísticamente significativos para una probabilidad del 95%.

4.2. Análisis del tráfico

Las cargas que fueron aplicadas en el modelo son: un eje simple de 100 kN y un eje tándem de 180 kN, colocados ambos en el borde de la losa. Estas condiciones específicas son corregidas por factores de equivalencia que tienen en cuenta el efecto del peso del eje y su posición en el pavimento.

Factor de ajuste por efecto del peso del eje (fp): Se determina a partir de la relación entre la tensión que ocasiona un eje de determinado peso (σ_{e}) y la originada por el eje referencia (σ_{r}). Se realizó un estudio factorial 3^3 combinando espesores y calidades de los materiales del sistema (resistencia a compresión del hormigón y módulo resiliente en el suelo), teniendo como variable de respuesta la relación de tensiones entre un eje de 82 kN y 100 kN.

Los ejes de los vehículos se mueven con la parte exterior de sus ruedas sobre una franja aproximadamente de 60 cm de ancho respecto al borde. En el método de diseño de la PCA se asume el 6% de camiones circulando dentro de esta franja, utilizándose un factor de reducción de las tensiones en el borde, teniendo en cuenta la distancia y la probabilidad. En la investigación se determinó la probabilidad de ocurrencia de los vehículos pesados circulando dentro de esta franja, en tres vías de dos carriles, con igual ancho de carril. Midiendo las distancias de cada vehículo desde el borde, se determinó que a la distancia de 60 cm desde el borde, la probabilidad

de camiones dentro de la franja es de 5,96%, lo que confirma los valores de la PCA^(xxxv), por lo que el coeficiente de reducción de tensiones obtenido, por la posición de la carga, es de $fp = 0,89$.

Tensiones equivalentes: Como resultado de la modelación del pavimento de hormigón simple, se obtuvieron las tensiones que se originan en los bordes de la losa, con y sin paseo de hormigón, aplicando una carga de un eje simple con ruedas duales de 100 kN y, en un segundo caso, un eje tándem de 90 kN sobre el borde del pavimento. Mediante un experimento multifactorial general, combinando espesores de losas entre 12 y 35 cm, con módulo resiliente del cemento entre 20-500 MPa, se construyeron tablas para ejes simples y tándem que permiten determinar las tensiones equivalentes en las losas, con y sin arceles de hormigón.

4.3. Modelo probabilístico para la determinación del número de repeticiones permisibles por fatiga en un pavimento de hormigón simple

La gran variabilidad que se observa entre los modelos de fatiga obtenidos por diferentes autores implica que adoptar una determinada ley puede llevar a un diseño no adecuado en determinadas condiciones. Con la información de diferentes leyes desarrolladas por distintos autores, obtenidas en pruebas en laboratorio con vigas o en tramos experimentales, se confeccionó un modelo probabilístico. Titus-Glover, Mallela, Darter, Voigt & Waalkes^(xxxvii) crearon un modelo probabilístico para el software StreetPave12^(xxxviii).

Para obtener los coeficientes del modelo, se realizó un análisis de supervivencia, que consiste en un conjunto de técnicas que permiten estudiar la variable *tiempo* hasta que ocurre un evento y aparecen otras posibles variables descriptivas, tomando como criterio determinar el número de repeticiones hasta el fallo y considerando el concepto de confiabilidad en el diseño.

Se le dan dos status a cada caso, fallo (1) y no fallo (0), este último considerado como valor censurado en el estudio. Del análisis de las



La gran variabilidad que se observa entre los modelos de fatiga obtenidos por diferentes autores implica que adoptar una determinada ley puede llevar a un diseño no adecuado en determinadas condiciones.

distribuciones mediante el uso de gráficos teóricos de probabilidad, que representa la función de densidad teórica linealizada, se comprobó que la función Normal brinda el mejor ajuste, por lo que se seleccionó para construir las curvas de supervivencia acumuladas.

Con la obtención de las curvas de número de repeticiones contra el porcentaje de supervivencia acumulado en cada relación de esfuerzo, se puede construir la superficie respuesta $\zeta(RT, S, \log N)$, denominándose S a la probabilidad de fallo. Tras estimar los coeficientes y realizar las transformaciones necesarias, el modelo probabilístico queda de la siguiente forma:

$$\log N_f = \left[\frac{-RT^{1000} \cdot \log(S)}{0.0108} \right]^{0.25}$$

En la validación se verificó la familia de curvas, derivadas de la expresión obtenida; el modelo propuesto es capaz de predecir el mismo número de repeticiones que el modelo de la PCA cuando la probabilidad es del 80% en un intervalo de relación de tensiones entre 0,55 y 0,8.

5. Desarrollo de tecnologías de avanzada para la modelación micro-mecánica de pavimentos rígidos

El desarrollo de la micromecánica se inició hace más de cien años con Voigt (1889), Einstein (1911) y Reuss (1929), siendo los primeros en el desarrollo de modelos micromecánicos que podrían utilizarse para el estudio del comportamiento de hormigones basados en los materiales constituyentes^(xxx). Las primicias de modelación micro-mecánicas se pueden agrupar en dos amplias categorías: las que tienen partículas que no interactúan y las que consideran partículas que interactúan entre sí.

Generalmente, los modelos con partículas que no interactúan se solucionaron con el empleo de modelos homogéneos y el desarrollo de métodos como elementos finitos y elementos de contorno. En la categoría de las partículas que interactúan se emplearon primeramente geometrías simplificadas, haciendo uso de métodos de elementos finitos y modelos Lattice (década del 90). En la década de 2000 se utilizaron geometrías más complejas, comenzándose a usar un enfoque micro-estructural con el método de los elementos finitos o métodos de los elementos discretos^(xxx). Se han desarrollado diversos trabajos^(xxx, xxxii, xxxiii, xxxiv, xxxv, xxxvi, xxxvii, xxxviii, xxxix, xl) en la modelación micromecánica del hormigón para pavimentos, en su mayoría los áridos han sido modelados con geometrías simplificadas.

En los hormigones para pavimentos hay parámetros que deben considerarse en el comportamiento de estos sistemas complejos, con una o más fases incrustadas en una matriz continua o discreta. Los parámetros son:

- 1) forma y morfología de las partículas;
- 2) tamaño de partículas y distribución de tamaños;
- 3) distribución espacial y concentración de partículas;

- 4) orientación de las partículas;
- 5) composición de la matriz o material adherente;
- 6) enlace entre las fases matriz y los componentes discretos.

Todos estos parámetros, entre otros, deben considerarse en una predicción micromecánica del comportamiento del hormigón para pavimentos. Algunas investigaciones^(xxxvi, xli) han demostrado la necesidad de considerar las partículas que interactúan en los estudios de los hormigones, pero debido a la complejidad de la composición y morfología (meso-escala o micro-escala) de estas mezclas y sus componentes, generalmente requieren del uso de soluciones numéricas de avanzada. Esto se ha abordado utilizando varios métodos numéricos, como el método de elementos finitos^(xlii) y el modelo Lattice^(xliii) y, actualmente, el método de elementos discretos^(xxx, xliii).

Para tener en cuenta las complejas características geométricas de los componentes de los hormigones para pavimentos, los investigadores han propuesto el uso de técnicas de captura y procesamiento de imágenes digitales que reproducen las microestructuras internas del material, es decir, la distribución espacial de los agregados dentro de la matriz o material adherente de la mezcla de hormigón.

Disponiendo de los estudios experimentales^(xlv) (geometría, distribución y geomorfología de los agregados, grueso, fino y filler) con los diferentes equipamientos de captura y procesamiento de imágenes se aplican las técnicas de generación de partículas virtuales individuales con la geometría real^(xlvii), para el caso de cada componente de la mezcla de hormigón, de modo tal que se disponga de un repositorio estocástico de partículas^(xlv). Posteriormente, se aplican las técnicas de empaquetamiento^(xxx, xlviii) de partículas para lograr una representación estocástica del hormigón para pavimentos.

Es por eso que se exige a los nuevos desarrollos numéricos que la forma, el tamaño y la distribución de las partículas agregadas y componentes de las mezclas se asemejen a las mezclas de hormigón real en el sentido estadístico y su representación estocástica. Las formulaciones de empaquetamiento establecidas^(xxx) emplean funciones de distribución (continuas, discretas y empíricas) para lograr la estocasticidad necesaria en la generación del medio. Para este propósito, se han desarrollado algunos modelos micromecánicos para simular las propiedades físico-mecánicas de los compuestos con microestructuras complejas.

Se requiere de un número de ensayos mínimo para calibrar y validar los modelos numéricos como base de investigación. El objetivo de estos estudios numéricos está en comprender la influencia de las propiedades físicas mecánicas del hormigón y de los elementos que lo constituyen, que se rigen por: las propiedades del agregado (morfología, forma, textura, graduación, estructura esquelética, propiedades mecánicas), propiedades del aglutinante o material adherente (características físico-mecánicas y químicas, etc.) y el efecto de las interacciones matriz-agregado (adhesión, absorción, interacciones fisicoquímicas, etc.).

5.1. Aspectos generales de modelación micro-mecánica de hormigones de matriz cementicia empleado en pavimentos rígidos

Los esfuerzos realizados en temas de modelación micro-mecánica del hormigón para pavimentos en las últimas décadas se pueden resumir de la siguiente manera:

- Para construir la microestructura digital de la mezcla de hormigón, se han utilizado dos tipos de enfoques: los modelos hechos por el usuario y los modelos basados en captura y procesamiento de imágenes.
- Para simular las interacciones en las microestructuras del hormigón, se han desarrollado diferentes modelos mecánicos, como los modelos elásticos, visco-elásticos lineales y no lineales, modelos basados en teoría de daño y los modelos visco-elasto-plásticos.
- Los modelos de elementos finitos desarrollados, que se han empleado para predecir el comportamiento (rigidez) del hormigón, investigar la distribución de deformaciones localizadas o estimar la anisotropía en el comportamiento (rigidez) y simular comportamientos de daño.

El objetivo de esta etapa de la investigación es progresar en el desarrollo de tecnologías de avanzada para la modelación micromecánica de hormigones para pavimentos, aprovechando los métodos numéricos y modelos constitutivos desarrollados en las etapas anteriores de macromodelación, como continuidad a los estudios de adecuación de los métodos de diseño de pavimentos rígidos.

En los estudios micro-mecánicos se han propuesto varias formas no circulares para aproximar la forma real de las partículas, que van desde grupos de discos o esferas, polígonos, elipses y elipsoides, hasta súper-cuádras, cilindros y poliedros o esfero-poliedros^{XXX, XLVIII}. Sin embargo, estos enfoques siguen siendo aproximaciones demasiado simplificadas para proporcionar una descripción precisa de la forma real de las partículas. Por estas razones, existe la necesidad de desarrollar enfoques sistemáticos para representar efectivamente las características geométricas realistas de las partículas granulares (áridos y material constituyente de las mezclas de hormigón) antes de la incorporación en la modelación numérica.

5.2. Modelación micromecánica de hormigones de matriz cementicia empleados en pavimentos

Durante más de 10 años se han efectuado varias investigaciones en el desarrollo de tecnologías de avanzada para la modelación micromecánica de materiales, aprovechando los desarrollos teóricos que antecedieron y desarrollando otros que mejoran algunos aspectos y deficiencias. Como continuidad de los trabajos de etapas anteriores, la visión de trabajo ha estado dirigida a contribuir al desarrollo de las tecnologías de modelación micromecánica para el estudio y comprensión del comportamiento de los hormigones para pavimentos, cuya finalidad es utilizar estas novedosas tecnologías numéricas

para adecuar los métodos de diseño mediante conceptos de modelación micromecánica.

5.2.1. Generación virtual de partículas reales individuales

Los desarrollos alcanzados en esta temática se centraron primeramente en la utilización de tecnologías desarrolladas por otros autores, que fueron evolucionando en el tiempo y mejorando algunos aspectos y deficiencias, aunque todas las problemáticas no están resueltas en su totalidad para la modelación virtual de los áridos (gruesos y finos) usados en los hormigones de pavimentos.

Paralelamente se comenzaron a desarrollar tecnologías propias de avanzada para la generación virtual de partículas reales individuales que solucionaran las problemáticas existentes en la modelación geométrica y morfológica de las partículas individuales de los elementos constituyentes de los hormigones para pavimentos.

Por su parte, los avances más significativos en la temática son los desarrollos propios que se han establecido en las investigaciones, que pueden resumirse en la generación aleatoria y la reconstrucción de partículas individuales virtuales reales, la validación pura para generación aleatoria y la reconstrucción de partículas individuales virtuales reales, así como las técnicas de comparación para generación aleatoria y la reconstrucción de partículas individuales virtuales reales.

5.2.2. Generación o empaquetamiento de partículas enfocados a modelación micromecánica de hormigones para pavimentos

La formulación del algoritmo de empaquetamiento de partículas para la modelación micromecánica de hormigones para pavimentos está soportada en una técnica de avance frontal. El problema principal consiste en obtener de una manera eficiente conjuntos de partículas que conformen un empaquetamiento y respeten la aleatoriedad de la micromecánica de los hormigones usados en pavimentos. Para lograr esto, es de especial importancia poder trasladar (sin rotar) una partícula de modo que esté en contacto (o no) con otras dos, en el caso 2D, o con otras tres, en el caso 3D, debido a que así se puede obtener una densidad local adecuada, en caso de precisarla.

El empaquetamiento comienza con un conjunto de dos partículas en cualquier posición, o una partícula en contacto (o no) con las paredes que definen el dominio o región que delimita la micromecánica del material, partículas que componen el frente de avance inicial. Entonces se genera una nueva partícula, o bien se escoge de un repertorio de partículas (generadas empleando cualquier tecnología de generación de partículas virtuales individuales reales) que serán añadidas al empaquetamiento que describe la micromecánica del hormigón.

La formulación establece una serie de pasos esenciales y su formulación detallada está establecida. El primero, de inicialización, consiste en crear el frente inicial de avance. El segundo, que se repite sucesivamente hasta el final, consiste en la construcción de una nueva partícula en contacto (o no) con las que forman el frente

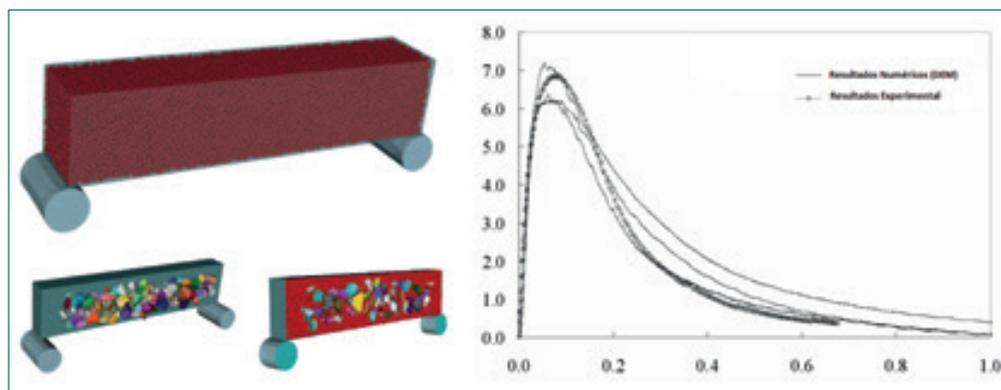


Figura 8. Modelación micromecánica de grietas en elementos cilíndricos de hormigón de cemento portland.

de avance, actualizándose este constantemente. La formulación se sustenta detalladamente en los siguientes aspectos^(xxx):

- Selección del tipo de partícula a generar (o combinaciones de tipos de partículas).
- Establecimiento del conjunto inicial de partículas o frente inicial de avance: viene dado por la cantidad y posición de las partículas iniciales.
- Técnicas de selección del frente de avance.
- Construcción de la partícula en contacto exterior con otras.
- Detección de intersecciones entre partículas: para poder agregar una nueva partícula al empaquetamiento es necesario verificar que no se interseque con ninguna otra.

La construcción de la partícula en contacto es uno de los pasos más importantes en las técnicas de empaquetamiento. La aplicación de esta tecnología en la modelación micromecánica de hormigones de pavimentos se puede ilustrar con su aplicación en la obtención más simplificada de los modelos geométricos y morfológicos de diferentes ensayos de hormigón para pavimentos de cemento portland.

Hacer una modelación micromecánica a un mayor nivel de detalle no sería complejo, pero el costo computacional aumentaría mucho al tratar de describir la geometría de los áridos gruesos, finos, filler y otros elementos.

Para ilustrar la aplicación de esta técnica para el estudio de comportamiento de hormigones de cemento portland, a través del módulo de rotura, se muestra en la Figura 8 el resultado de la modelación numérica micromecánica de ensayo de una viga a flexión de una muestra circular para modelación micromecánica de grietas.

6. Conclusiones

Con el desarrollo de las tecnologías de avanzada para la modelación micromecánica de hormigones de cemento portland se establecen las herramientas necesarias para estudiar el comportamiento de los pavimentos rígidos. El trabajo realizado en la primera etapa de la investigación para la adaptación del método de diseño de la PCA mediante una modelación macro-mecánica, empleando el método de los elementos finitos, con el uso de las tecnologías de avan-

zadas desarrolladas mediante modelación micromecánica, permitirá comprender mejor el comportamiento del hormigón ante la aplicación de las sollicitaciones del tráfico, y por ende, establecer leyes del comportamiento de estos materiales en diferentes condiciones ambientales para el diseño empírico-mecanicista.

Como continuidad de las investigaciones de este grupo multidisciplinar, se desarrollan nuevos métodos de diseño de pavimentos (flexibles y rígidos) con el uso de tecnologías experimentales y numéricas basadas en conceptos micro-mecánicos.

Para enfrentar este enfoque y superar las limitaciones genéricas de los enfoques analíticos y semi-empíricos o la mecánica del daño continuo, se trabaja en el desarrollo de tecnologías de avanzada que propicien obtener una representación adecuada de la micromecánica de los hormigones de cemento portland para pavimentos rígidos. Con estas tecnologías es posible la creación de modelos micro-mecánicos (continuo y discreto), basados en métodos numéricos como una alternativa más prometedora que las pruebas de laboratorio. No se trata en este caso de desechar totalmente los estudios experimentales, sino de combinar las técnicas numéricas micromecánicas con los estudios experimentales para disponer de datos reales que permitan calibrar y validar los modelos numéricos y abaratar los costos de investigación en la mejora de los métodos de diseño de pavimentos.

Una de las técnicas que pueden propiciar un avance muy rápido en la modelación de los hormigones de cemento portland para pavimentos rígidos es la técnica de captura y procesamiento de imágenes de materiales a diferentes escalas, como imágenes de cámaras digitales de alta resolución, láser, escáner 3D y tomografía de rayos X, lo que permite que puedan construirse microestructuras bidimensionales y tridimensionales de estos materiales.

La microestructura virtual de los hormigones se genera a partir de la técnica de captura y procesamiento de imágenes y empaquetamiento del medio con técnicas de partículas con su correspondiente validación de la modelación virtual con el medio físico. Disponiendo del medio físico discreto para ser utilizados en modelaciones (continuas o discretas), se pueden efectuar los ensayos a nivel de la microestructura virtual, usando los modelos numéricos avanzados.

Estos ensayos virtuales ayudarán a los ingenieros a evaluar los efectos de cualquier cambio en las propiedades del material componente sobre el comportamiento de la mezcla de hormigón con un número mínimo de pruebas de laboratorio para calibrar los modelos numéricos. Los ensayos virtuales también serán una herramienta eficiente en la comprensión del comportamiento fenomenológico de los materiales de los hormigones de pavimentos en la microescala y en la mejora de los modelos constitutivos en la microescala, incluido el desarrollo y mejora de los métodos de diseño.

Referencias bibliográficas

- I. AASHTO, Guide for Mechanistic-Empirical Design in Rigid Pavement Structures 2004, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) & Transportation Research Board (TRB). Illinois, USA.
- II. Unidad de Materiales y Pavimentos del PITRA- LanammeUCR. Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA). Instrumentación y resultados del primer ensayo acelerado a escala natural en Costa Rica. San José, Costa Rica Junio, 2014.
- III. IRAM, Norma IRAM 1547. Ensayo de tracción por flexión de probetas de concreto. (Método de la viga simplemente apoyada con carga en los tercios de la luz), 1992. Edición 1. Vigente. Instituto Argentino de Normalización y Certificación: p. 7.
- IV. Oñate, E. (1995). Cálculo de Estructuras por el Método de Elementos Finitos (Segunda ed.). Barcelona, España: CIMNE.
- V. Zienkiewicz, O. C. & Taylor, R. L. (2000). Error de discretización e índice de convergencia In M. J. Norte (Ed.), El Método de los Elementos Finitos. Formulación Básica y Problemas Lineales. (4ta Edición ed., Vol. 1, pp. 37-39). Madrid, España: CIMNE.
- VI. Zienkiewicz, O. C. & Taylor, R. L. (2004). El Método de los Elementos Finitos. (Vol. I). Barcelona, España: CIMNE, Cuarta Edición, 339 p.
- VII. Davids, W. G., Turkiyyah, G. M., Mahoney, J. P., Wang, Z. & Bush, D. (2003). Three-dimensional finite element analysis of jointed plain concrete pavement with EverFE2. 2. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1853(1), 92-99.
- VIII. Fang, C., Haddock, J., Bobet, A. & Sotelino, E. (2004). 3D Finite Element Study on Contributions of Load Transfer at Concrete Pavement Joint.
- IX. Khan, M. I., Qadeer, M. A. & A.B.Harwalkar. (2014). Mechanistic Analysis of Rigid Pavement for Temperature Stresses Using Ansys. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), Vol. 11(No.2).
- X. Kmiecik, P. & Kamiński, M. (2011). Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 11(3), 623-636.
- XI. López, F. M. H. & Piusseaut, E. T. (2015). Modelación computacional en 3D de un pavimento de concreto con carga aplicada en el borde. Carreteras, Revista Técnica de la Asociación Española de la Carretera (No. 199 (Enero-Febrero)), pp. 79-86.
- XII. Pánek, P. & Vébr, L. (2007). Application of 3D FEM models for the analysis of PCC slab stress state due to acting wheel load. Update, 17, 12.
- XIII. Ullidtz, P. (1987). Pavement analysis. Developments in civil engineering. Elsevier, Amestrdam, 3(5556), 034.
- XIV. Huang, Y. H. (2004). Pavement analysis and design (Second Edition ed.). University of Kentucky: Pearson Prentice Hall.
- XV. Papagiannakis, A. T. & Masad, E. A. (2008). Characterization of Pavement Subgrades and bases. In Pavement Design and Materials (pp. 46). Texas, San Antonio, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- XVI. Cervo, T. C. (2004). Estudo da Resistencia a Fadiga de Concretos de Cimento Portland para Pavimentação. (Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- XVII. Krätzig, W. B. & Pölling, R. (2004). An elasto-plastic damage model for reinforced concrete with minimum number of material parameters. Computers & structures, 82(15), 1201-1215.
- XVIII. Lee, J. & Fenves, G. L. (1998). Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. Journal of engineering mechanics, 124(8), 892-900.
- XIX. Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S. & Oñate, E. (1989). A plastic-damage model for concrete. International Journal of solids and structures, Vol. 25(No.3), 299-326.
- XX. ABAQUS/CAE. (2014). 6.14 documentation. Dassault Systemes Simulia Corporation.
- XXI. Balbo, J. T. & Severi, A. A. (2002). Thermal Gradients in Concrete Pavements in Tropical Environment.
- XXII. AS3600. (1994). Concrete Structure. In: Standards Australia.
- XXIII. Austroads. (2004). Technical Basic of Austroads Pavement Design Guide. In. Sydney, Australia: Austroads Inc.
- XXIV. León, M. (1997). Estudio de la interacción estática suelo-estructura. Aplicaciones al análisis de cimentaciones. La Habana, Cuba, 108 p.
- XXV. Yoder, E. J. & Witczak, M. W. (1976). Pavement Type, Wheel Loads, and Design Factors. In I. JONH WILEY & SONS (Ed.), Principles of pavement design. (pp. pp 4-22). New York, USA: Wiley-Interscience Publication.
- XXVI. PCA. (1984). Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements. In Thickness Concrete Pavement Design (Vol. ISO10P): Portland Cement Association.
- XXVII. Titus-Glover, L., Mallela, J., Darter, M., Voigt, G. & Waalkes, S. (2005). Enhanced portland cement concrete fatigue model for streetpave. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board (1919), 29-37.

- XXVIII. StreetPave12. (2014). Thickness design technology for streets and local road pavements. Illinois: American Concrete Pavement Association (ACPA). Retrieved from <http://www.acpa.org/streetpave/>
- XXIX. Kim, H. "Investigation of Toughening Mechanisms In the Fracture of Asphalt Concrete Using The Clustered Discrete Element Method". Thesis of Doctor of Philosophy in Civil Engineering in the Graduate College of the University of Illinois at Urbana-Champaign, Doctoral Thesis 2007.
- XXX. Recarey Morfa, C.A; Oñate de Navarra, E., Muniz de Farias, M.; Tejada Piusseaut. E. & Hernández López, .M.. "Desarrollo de tecnologías de avanzada de modelación micro-mecánica de pavimentos rígidos y flexibles". Informe de Proyecto de Investigación Ministerio de la Construcción, Republica de Cuba, 2019.
- XXXI. Heukelom W. & Klomp, A.J.G. (1964), "Road Design and Dynamic Loading", Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists, Ann Arbor, Michigan, Vol. 33.
- XXXII. Hashin, Z. (1965), "Viscoelastic Behaviour of Heterogeneous Media", Journal of Applied Mechanics, Trans. ASME, No. 9, pp. 630-636.
- XXXIII. Christensen, R.M. & Lo, K.H. (1979), "Solutions for Effective Shear Properties in Three Phase Sphere and Cylinder Models", Journal of Mechanics in Physics and Solids, Vol. 27, pp. 315-330.
- XXXIV. Routhenburg, L., Bogobowicz, A. & Hass, R. (1992), "Micromechanical Modeling of Asphalt Concrete in Connection with Pavement Rutting Problems", 7th International Conference on Asphalt Pavements, Vol. 1, pp. 230-245.
- XXXV. Witczak, M.W. & Fonseca, O.A. (1996), "Revised Predictive Model for Dynamic (Complex) Modulus of Asphalt Mixtures", Transportation Research Record, No. 1540, pp. 15-23.
- XXXVI. Buttlar, W. G. & Roque, R. (1996), "Evaluation of Empirical and Theoretical Models to Determine Asphalt Mixture Stiffnesses at Low Temperatures", Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 65, 99 -141.
- XXXVII. Navko, G., Mukerji, T. & Dvorkin, J. (1998), The Rock Physics Handbook, pp. 154-156, Cambridge University Press.
- XXXVIII. Mohamed, A.R. & Hansen, W. (1999), "Micromechanical Modeling of Concrete Response under Static Loading-Part I: Model Development and Validation", ACI Material, Vol. 96, No. 2, pp. 196-203.
- XXXIX. Zhong, X. & Chang, C.S. (1999), "Micromechanical Modeling for Behavior of Cementitious Granular Materials", Journal of Engineering Mechanics, pp.1280-1285.
- XL. Kose, S., Guler, M., Bahia, H.U. & Masad, E., (2000), "Distribution of Strains within Asphalt Binders in HMA Using Image and Finite Element Techniques", Transportation Research Record, No. 1728, pp. 21-27.
- XLI. You, Z. & Buttlar, W.G. (2005), "Discrete Element Modeling to Predict the Modulus of Asphalt Concrete Mixtures", ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 17, pp. 140-146.
- XLII. Sadd, M.H., Dai, Q., Parameswaran V. & Shukla, A. (2004), "Microstructural Simulation of Asphalt Materials: Modeling and Experimental Studies", ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 16, pp. 107-115.
- XLIII. Buttlar, W.G. & You, Z. (2001), "Discrete Element Modeling of Asphalt Concrete: a Micro-fabric Approach", Transportation Research Record, No. 1757.
- XLIV. Chang, K.G. & Meegoda, J.N. (1997), "Micromechanical Simulation of Hot Mix Asphalt", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 123, No. 5, May, pp. 495-503.
- XLV. Muniz de Farias, M.; Recarey Morfa, C.A; Tejada Piusseaut. E.; Hernández López, .M. & Oñate de Navarra, E., "Estudio experimental de agregados para la modelación y caracterización de partículas reales virtuales". Informe de Proyecto Pronex. República de Brasil, 2019.
- XLVI. Recarey Morfa, C.A; Tejada Piusseaut. E.; Hernández López, .M., Oñate de Navarra E., Muniz de Farias, M.; Castro Fuentes, M. & Pena Aguila, J.C."Desarrollo de tecnologías de avanzada para la modelación y caracterización de partículas individuales reales 3D virtuales". Informe de Proyecto de Investigación. Ministerio de la Construcción, Republica de Cuba, 2019.
- XLVII. Recarey Morfa, C. A., Pérez Morales, I. P., Muniz de Farias, M., Roselló Valera, R., Hernández, E. Giraldo Zuluaga, R. A. & Onate de Navarra, E. "Advances in particle packing algorithms for generating the medium in the Discrete Element Method". Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. Nov. 2018. DOI: 10.1016/j.cma.2018.11.011.
- XLVIII. Pérez Morales, I.P. "Desarrollo de técnicas novedosas para la modelación con métodos de partículas: Método de Elementos Discretos". Tesis para optar por el grado de doctor en ciencias técnicas, especialidad de mecánica computacional. Universidad Central de Las Villas, Cuba, 2012. Tutor: Carlos A. Recarey Morfa.
- XLIX. Hernández López, Félix Michael. Procedimiento para el diseño por fatiga de pavimentos de concreto simple para carreteras en Cuba. Tesis doctoral. La Habana, Cuba. 2016. ■



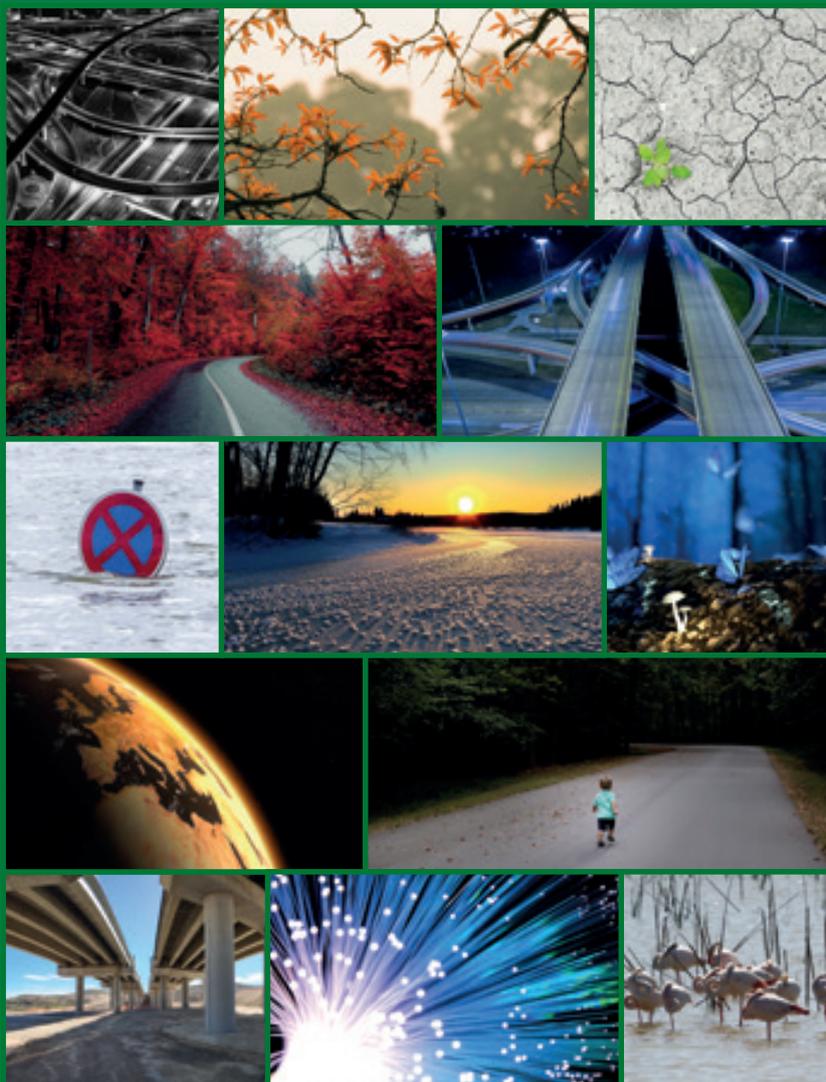
**acceso
 al trabajo
 completo**

V CONGRESO ANDALUZ DE CARRETERAS

Hacia la próxima generación de c@rreteras

GRANADA, DEL 6 AL 8 DE ABRIL DE 2022

Especial “páginas verdes”



presentación

- 85 Juanma Moreno.** Presidente de la Junta de Andalucía
La sostenibilidad y el respeto al Medio Ambiente, ejes de la red viaria andaluza
- 87 Marifrán Carazo.** Consejera de Fomento, Infraestructuras y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía
Innovación y sostenibilidad, cimientos de la nueva carretera
- 89 Enrique Catalina Carmona.** Director General de Infraestructuras de la Junta de Andalucía
Hacia la proxima generacion de carreteras

artículos

- 92 MASAI, los materiales de la próxima generación de carreteras**
Fernando Moreno Navarro
- 96 Carreteras conectadas: un proceso en siete fases**
Jacobo Díaz Pineda
- 101 Sistema Seguro: nuevo enfoque con el usuario como protagonista**
Ana Luz Jiménez Ortega
- 107 Adaptación de las carreteras al clima**
Elena de la Peña González

tribuna

- 112 IRMD 2022. International Road Maintenance Day**
Juan José Potti

La sostenibilidad y el respeto al Medio Ambiente, ejes de la red viaria andaluza

Juanma MORENO
Presidente de la Junta de Andalucía



El V Congreso Andaluz de Carreteras, promovido por la Consejería de Fomento, Infraestructuras y Ordenación del Territorio, que se celebra en Granada, es, sin duda, una cita esperada que regresa, tras una ausencia de quince años, y que va a suponer un escenario de lujo para compartir e intercambiar ideas, proyectos e iniciativas.

Un encuentro importante en el que poder impulsar y crear distintas sinergias en un tema clave como este, porque no debemos olvidar que de las infraestructuras viarias depende algo tan importante y necesario en el día a día como es la movilidad, no solo de las personas, sino también de las mercancías.

Y no solo eso, sino que ello va ligado al mantenimiento y creación de miles de empleos y de empresas dedicadas al sector de la construcción que, como muchas otras, han pasado momentos muy complicados a causa de la pandemia de la Covid-19.

El compromiso del Gobierno andaluz con el Medio Ambiente es firme e ineludible y así lo hemos demostrado desde el primer momento, teniendo a la sostenibilidad siempre por bandera y siendo una de las prioridades, no solo de la Consejería de Fomento, sino de todo el Ejecutivo al completo.

En Andalucía contamos con el Sello Verde, que acredita la puesta en marcha de medidas respetuosas con el Medio Ambiente y que contribuyen a la reducción de las emisiones y a la protección del paisaje.

Además, estamos poniendo todos nuestros esfuerzos para impulsar la Revolución Verde, porque consideramos esencial acelerar la transición hacia un modelo productivo basado en una realidad, y es que el progreso y la sostenibilidad no son contrapuestos, sino todo lo contrario, son la clave para activar el paradigma al que necesitamos ir.

Queremos que esta Revolución llegue a todos los rincones de Andalucía y a todas las materias, porque la defensa del Medio Ambiente es el eje primordial de todas nuestras políticas.

Desgraciadamente, y debido a la dejadez y falta de interés de Gobiernos anteriores, nos encontramos al llegar con que en Andalucía había muchos proyectos olvidados en los cajones, otros que han sufrido grandes retrasos, que se han quedado a medio hacer y otros que no han llegado a ver la luz. Son muchos los ejemplos, pero, por mencionar alguno, destacaré uno que es esencial en términos de competitividad y logística, como es la finalización de la Autovía del Almanzora, un proyecto recuperado por este Gobierno.

Granada acoge la celebración del V Congreso Andaluz de Carreteras. "una cita esperada que regresa, tras una ausencia de quince años, y que va a suponer un escenario de lujo para compartir e intercambiar ideas, proyectos e iniciativas".

Necesitamos unas infraestructuras de primera. Por ello nos marcamos como objetivo invertir apostando por la innovación y la sostenibilidad, para que nuestra comunidad cuente con una red viaria como la que merece, a fin de atender a los andaluces y a todos los usuarios que vienen a vernos y que aumentan año tras año.

Y lo hacemos con hechos y no con palabras. Ya hemos destinado 576 millones de euros a la mejora de esta red de titularidad autonómica y a ello se suma una inversión de 237,5 millones de euros en 2022 para la conservación de carreteras, seguridad vial y red convencional, lo que supone 60 millones de euros más que en 2021.

El presupuesto para la conservación y seguridad vial de los más de 10.500 kilómetros que componen nuestras carreteras autonómicas se ha ido incrementando cada año, cambiando la tendencia que existía con gobiernos anteriores, que redujeron a la mitad las partidas entre 2008 y 2018. En 2019, invertimos 129 millones de euros, 44 millones más que el año anterior, y en 2020 y 2021 se han destinado 134,5 y 150 millones de euros, respectivamente.

Apostamos por unas vías más inteligentes y más seguras, y lo hacemos con nuevos proyectos e iniciativas. Una muestra es el impulso que hemos dado al uso de material reciclado en el asfaltado y conservación de las carreteras andaluzas.

Los distintos avances en investigación nos están permitiendo contar con una red de carreteras más sostenible, en línea con el Sello Verde que estamos implantando en todas y cada una de nuestras actuaciones, buscando que todos los proyectos tengan el menor impacto ambiental posible.

Además, está previsto que, dentro de poco, comiencen las obras de refuerzo del firme en nueve kilómetros de la autovía A-92G, entre Granada y Santa Fe, con un presupuesto de 2,8 millones de euros y con aportación de fondos europeos.

Se trata de la primera de las muchas obras que se llevarán a cabo para convertir esta autovía en el primer corredor verde de Andalucía, y en la que se usarán materiales asfálticos sostenibles, llamados MASAI, que ya han sido probados con éxito en varias carreteras andaluzas y que reducen las emisiones contaminantes.

Estos MASAI se usarán como material preferente en el refuerzo de firmes en las próximas licitaciones, porque minimizan la generación de residuos, las emisiones y el consumo de combustibles fósiles.

En definitiva, trabajamos para que Andalucía cuente con unas carreteras de última generación en las que la innovación y la sostenibilidad sean los ejes principales que nos marquen el camino a seguir. ■

“Queremos que la Revolución Verde llegue a todos los rincones de Andalucía y a todas las materias, porque la defensa del Medio Ambiente es el eje primordial de todas nuestras políticas”.



Innovación y sostenibilidad, cimientos de la nueva carretera

Marifrán CARAZO

Consejera de Fomento, Infraestructuras y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía



Invertir en carreteras y seguridad vial salva vidas, al mejorar la movilidad de personas y mercancías; por tanto, ayuda a vertebrar el territorio, a luchar contra la despoblación, contribuye al mantenimiento de empleos y de empresas locales del sector de la construcción y, además, garantiza desplazamientos más cómodos, favoreciendo la generación de actividades logísticas vinculadas a la agricultura, a la ganadería, la pesca y al sector industrial, así como a la llegada de turistas. Ayuda, por tanto, a la reactivación económica.

Dada la importancia de las infraestructuras viarias, el nuevo equipo de la Consejería de Fomento, Infraestructuras y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía situó entre sus principales objetivos durante estos tres años de gobierno recuperar el nivel inversor perdido en las últimas décadas, apostando por la innovación y la sostenibilidad para disponer ya de carreteras de nueva generación.

Por eso mismo, después de 15 años, la Consejería que dirigió ha promovido el V Congreso Andaluz de Carreteras, que se celebra en Granada, retomando así la Asociación Española de la Carretera la organización de este gran encuentro viario con el lema *Hacia la próxima generación de Carreteras*, con el que queremos que se creen sinergias en un sector fundamental para la reactivación económica y el progreso de la comunidad andaluza y de España.

Andalucía cuenta con 10.500 kilómetros de carreteras de titularidad autonómica que los anteriores gobiernos andaluces no supieron conservar ni gestionar convenientemente. De hecho, entre 2008 y 2018, los presupuestos destinados a esta materia se redujeron a la mitad y, según un informe

técnico de la Dirección General de Infraestructuras, 1.800 kilómetros de carreteras autonómicas estaban en muy mal estado.

Ante esta sorprendente y mala herencia recibida, el nuevo Gobierno andaluz ha destinado ya 576 millones de euros a la mejora de la red viaria de titularidad autonómica, una partida que ha servido para paliar el déficit de inversiones en anteriores mandatos, que ha llevado a una pérdida patrimonial del valor de nuestras carreteras de más de 1.000 millones.

Y lo hemos hecho apostando por la innovación y por la Revolución Verde que marca la gestión del Gobierno andaluz. La Consejería de Fomento ha desarrollado su propio *sello verde*, con el que buscamos que todos nuestros proyectos tengan el menor impacto ambiental posible.

Por eso, somos pioneros a nivel mundial en el uso en capa de rodadura de una mezcla elaborada con el propio material fresado de la vía, la incorporación de polvo de neumático, con fabricación y extendido a baja temperatura. Utilizamos Materiales Asfálticos Sostenibles Automatizados e Inteligentes (más conocidos por sus siglas, MASAI)

Tramo Cucador-La Concepción de la Autovía del Almanzora, ya finalizado. Actualmente se ejecuta el tramo La Concepción-A-7. La inversión total de la actuación asciende a 50 M€.



en la conservación de autovías como la A-92, que conecta Sevilla y Almería, gracias a que ya hay una nueva cultura de los firmes de nuestras carreteras, donde el uso de diferentes materiales reciclados en su fórmula tiene gran importancia, siendo, además, su fabricación y extendido más cuidadosas con el medio ambiente, con mezclas semi-calientes y, por tanto, con menor emisión de CO₂, que se suman al carácter sostenible de estos materiales.

Y ello es posible gracias a la labor de los investigadores, en este caso, de la Universidad de Granada, y la colaboración de la iniciativa privada.

Es decir, contamos con una mezcla para el pavimento que es menos contaminante y que reutiliza el material, fomentando la economía circular, con un mejor aprovechamiento de nuestros recursos. El futuro ya está aquí. La nueva generación de carreteras ya es una realidad.

Al igual que hemos hecho realidad una larga lista de proyectos que estaban abandonados por desidia, como la finalización de la Autovía del Almanzora en Almería. Es sólo un ejemplo del cambio pilotado por el nuevo Gobierno andaluz. En tres años, la Junta de

Andalucía ha invertido 50 millones para acabar un tramo y comenzar la obra del que enlazará por fin con la Autovía del Mediterráneo, la A-7, dando así salida al Levante a todos los productos de la Comarca del Mármol, así como a los frutos de la potente agricultura almeriense.

Ahora más que nunca es necesario reactivar la economía, despertar el potencial andaluz dormido y crear empleo, generando riqueza para Andalucía y para toda España.

Para ello, las infraestructuras viarias son clave, por eso, el Gobierno de Juanma Moreno no ha parado ni una sola obra pese a la grave crisis que ha provocado la pandemia del Covid-19, y sigue apostando por vertebrar el territorio, mejorar la movilidad de personas y mercancías y por generar actividad en el sector de la construcción, siempre de la mano de la innovación y la sostenibilidad medioambiental. La sociedad actual así nos lo reclama y, por responsabilidad, así lo estamos haciendo.

Sigamos, entre todos, diseñando un mejor mapa viario para las futuras generaciones. ■

Mejoras en el firme en la carretera de Pampico (A-358) en El Ejido (Almería). Actuaciones por valor de 1,5 millones de euros.





El trabajo de un grupo

Las grandes infraestructuras y servicios se realizan a base de esfuerzo, de capacidad técnica, de trabajo en equipo, de calidad, experiencia y constancia.

En Sando llevamos más de 45 años caminando juntos, sin pausa, con la misma fuerza y entusiasmo del que se reinventa cada día, de quien se adapta a los cambios, repartiendo el esfuerzo entre un equipo de profesionales cualificados para trabajar hacia un mismo objetivo, la superación.



sando

www.sando.com

Hacia la próxima generación de carreteras

Después de 15 años de su última edición, es un placer y un orgullo recuperar el Congreso Andaluz de Carreteras, sin duda, uno de los eventos de referencia en nuestro sector y, en esta época que nos ha tocado vivir, mucho más necesario y esperado si cabe.

Hace poco más de tres años que este nuevo equipo llegó a la Consejería de Fomento, Infraestructuras y Ordenación del Territorio, un gran reto y honor para todos los que formamos el equipo a las órdenes de nuestra Consejera Marifrán Carazo. Un equipo muy técnico, seguramente el más técnico que jamás haya tenido esta consejería, y una responsabilidad enorme la de dirigir la gestión, en mi caso, de la amplísima red de carreteras titularidad de la Junta de Andalucía: superamos los 10.500 kilómetros.

Nuestra red, aparte de la longitud, tiene una diversidad enorme; contamos con más de 1.000 km de vías de alta capacidad, con la A-92 como gran vía vertebradora, carreteras convencionales o carreteras de montaña; en este caso tenemos la carretera asfaltada más alta de Europa, la A-395, que asciende a nuestra estación de esquí y continúa hasta el Mulhacén.

Este congreso tiene tres pilares fundamentales y así los hemos recogido en cada uno de los días que durará el mismo:

- Sostenibilidad
- Innovación - Digitalización
- Seguridad

Sostenibilidad. Mucho antes de que este término estuviera en cualquiera de los discursos actuales, nosotros ya apostamos por él. Desde el primer momento, entendimos que todas nuestras actuaciones debían llevar este marchamo e impulsamos el Sello Verde. Este Sello Verde representa un modelo de gestión responsable y eficiente, bajo criterios de sostenibilidad ambiental.

Enrique CATALINA CARMONA
*Director General de Infraestructuras
de la Junta de Andalucía*



Innovación – Digitalización. Somos conscientes de la importancia de la I+D+i. Apostamos desde el primer momento por ir un paso por delante, salir de nuestra zona de confort y explorar nuevos caminos:

- Participando en proyectos como el lanzado conjuntamente con la AEC para estudiar la correlación de IRI & Emisiones de CO₂.
- Prestando colaboración institucional y apostando totalmente por el desarrollo de nuevas formas de ver al aglomerado, hoy nuestras mezclas MASAI, desarrolladas con el Laboratorio de Ingeniería de la Construcción de la ETS de ICCP de Granada, un ejemplo de modelo de éxito.
- Desarrollando el gemelo digital de nuestra red, que hoy es una realidad y que será la base de una forma nueva de gestionar y planificar nuestras carreteras del futuro.

Seguridad. Como administración, nuestro deber es conseguir la máxima seguridad en nuestra red, garantizar la seguridad de los millones de usuarios que diariamente hacen uso de ella. Por este motivo, a pesar de los tiempos tan complicados en los que nos ha tocado gestionar, hemos ido aumentando año tras año el presupuesto destinado a conservación, porque tenemos un gran patrimonio que hay que preservar.

No corren buenos tiempos para la carretera, nos quieren poner la etiqueta de que somos los que contaminamos, que no somos sostenibles, que no somos digitales. Nada más alejado de la realidad.

Nosotros somos defensores a ultranza de la carretera, no se entien- de un gran país sin una amplia, planificada y bien conservada red de carreteras.



La carretera crea riqueza, es pieza clave para todos los sectores productivos, agrícola, industrial, turístico... La carretera contribuye al arraigo de la población y a la configuración de sociedades más desarrolladas. La carretera contribuye, por tanto, al bienestar social, y debe de ser considerada como uno de sus pilares.

Por todo ello, no entendemos que se nos excluya del reparto de los fondos extraordinarios que Europa ha lanzado, precisamente, para potenciar y reactivar las maltrechas economías de los territorios, tras la sucesión de hechos que nos asolan desde el inicio del año 2020.

Aun con todo eso, en Andalucía hemos apostado firmemente por estas tres líneas que soportan el V Congreso Andaluz de Carreteras.

El arduo trabajo está dando sus frutos, y aunque escasos, (105 M€), hemos sido la única comunidad que ha recibido fondos NEXT GENERATION para nuestras carreteras, fondos para el uso y desarrollo de mezclas sostenibles, MASAI, para eficiencia energética en iluminación, para pantallas acústicas y para digitalización de nuestra red.

Hay que ser optimistas y este congreso servirá, entre otras cosas, para exponer y debatir todo lo que el sector está haciendo en este sentido y el cambio paradigmático que está sufriendo, evolucionando hacia la nueva generación de carreteras.

Como anticipo, os animo a no dejar de leer los artículos que incluye esta edición especial de la Revista *Carreteras* "Páginas Verdes" con motivo del V Congreso Andaluz de Carreteras.

Artículos de grandes profesionales, referentes de nuestro sector y que, con gran maestría y precisión, nos dan las claves sobre hacia dónde debemos avanzar.

Ana Luz Jiménez Ortega Artículo sobre "Sistema Seguro"

ICCP, Jefa Provincial y Coordinadora de la DGT en Andalucía, Ceuta y Melilla (merecedora, recientemente, de la Medalla al Mérito Profesional por parte del Colegio de ICCP).

Su visión de: "Se asume que los accidentes ocurren, pero es inadmisibles que tengan como consecuencia el fallecimiento o las heridas graves en las personas", ya nos da idea de por dónde debemos transitar en la planificación, construcción y conservación de las vías, sin olvidar la formación de los usuarios.

Fernando Moreno Navarro Artículo sobre las mezclas MASAI

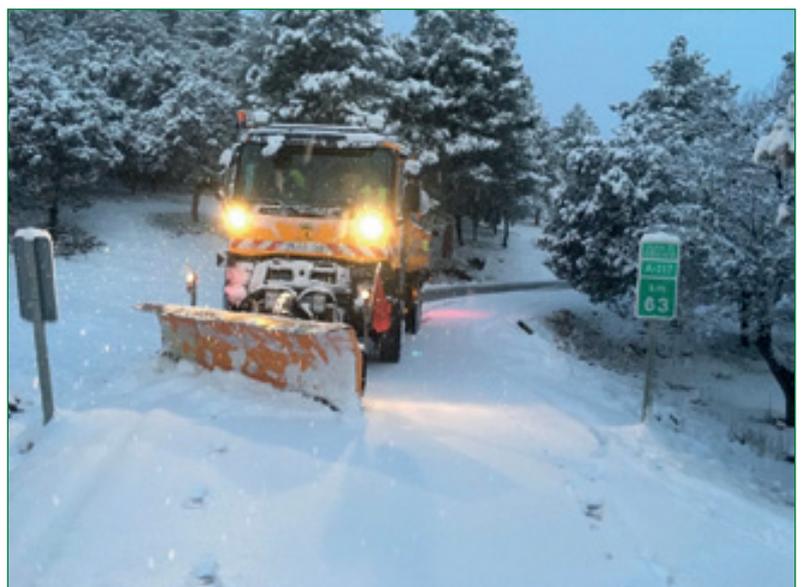
Doctor ICCP, Subdirector del Laboratorio de Ingeniería de la Construcción de la ETSICCP de la Universidad de Granada.

Aun pecando de no ser humilde por la parte que nos toca a la Consejería de Fomento, he de decir que las mezclas MASAI son un producto de éxito absoluto. Mérito del gran trabajo de Mayca y Fernando, Fernando y Mayca, y su equipo desde el LABIC de la ETS ICCP de Granada (Andalucía).

MASAI tiene todo lo que es este congreso: Innovación, Sostenibilidad, Digitalización, Seguridad, empuje empresarial y colaboración de la Administración. Esta es la nueva cultura en mezclas asfálticas: MASAI.

Además, para cerrar el círculo, la implementación de este tipo de mezclas nos ha permitido conseguir fondos europeos. Empezamos con un proyecto piloto de un millón de euros que hoy es una realidad con una financiación de 60 millones. Acabamos de empezar.

Fernando es el que mejor puede explicar técnicamente qué es MASAI y la elección de ese nombre; por tanto, este artículo es de lectura obligada.





Elena de la Peña González

Artículo: Adaptación de la carretera al clima

Doctora ICCP. Subdirectora General Técnica de la Asociación Española de la Carretera.

En estos últimos tiempos, donde los fenómenos climáticos “singulares” son más frecuentes, el artículo de Elena tiene una relevancia especial y marca las pautas a tener en cuenta a la hora de diseñar, gestionar y mantener nuestras carreteras. Raro es el año que en Andalucía no sufrimos una DANA, o recordar el episodio que sufrió la Comunidad de Madrid con Filomena en enero de 2020.

Como indica Elena, las comunidades autonómicas estamos desarrollando marcos estratégicos y programas al respecto. En el #CAC2022 contaremos con la Directora de Calidad Ambiental y Cambio Climático de la Junta de Andalucía, María López Sanchís.

Jacobo Díaz Pineda

Artículo: Carreteras conectadas.

Un proceso en 7 fases

ICCP. Director General de la Asociación Española de la Carretera.

No hay que presentar a Jacobo dentro del mundo de la carretera, referente más que reconocido en este sector. Defensor de la digitalización de la carretera como recurso para obtener una infraestructura inteligente que nos aporte infinidad de datos y oportunidades, haciendo posible que la carretera se sitúe a otro nivel.

Como él indica, este objetivo debe ser concebido como estratégico para el país, no le falta razón.

Describe este proceso en 7 fases, desde la adaptación física de la carretera hasta la formación de los gestores de la red. Y propone

que la primera carretera conectada sea Madrid-Lisboa. Yo le doy otra alternativa, la A-92, desde Almería a Sevilla (no por nada, Andalucía es como Portugal, pero apaisada).

Seguro que más pronto que tarde serán una realidad.

Juan José Potti

Artículo: IRMD (Día Internacional de la Conservación Carreteras)

Presidente de la EAPA (European Asphalt Pavement Association).

Juanjo, activo e inquieto como él solo, es el inventor-fundador del IRMD (International Road Maintenance Day). Estamos en su quinta edición y el hecho de que este año coincida con el V Congreso Andaluz de Carreteras hará que ambos entren en “resonancia” y amplifiquen su repercusión digital.

En esto Potti es experto y prueba sobrada de ello es a los niveles que está llevando el IRMD y que hizo que en su última edición batiera todas las marcas de impacto digital.

El slogan para este año del #IRMD2022: “Conservar las carreteras es preservar el Medio Ambiente”, en perfecta sintonía con nuestro congreso. Según refleja en su artículo, “Cada 1% de reducción en las emisiones de los vehículos genera una reducción equivalente a las emisiones de todas las mezclas asfálticas producidas en la Unión Europea”.

Un IRI en buen estado contribuye al medio ambiente. Invirtamos en ello.

Espero que os sea interesante esta edición especial de la Revista *Carreteras* y espero veros a todos los días 6 a 8 de abril en el V Congreso Andaluz de Carreteras. ■

MASAI, los materiales de la próxima generación de carreteras

MASAI, the materials of the next generation of roads

Fernando MORENO NAVARRO

Profesor de la ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Granada y Subdirector de LabIC.UGR.

RESUMEN

Desde el Laboratorio de Ingeniería de la Construcción de la Universidad de Granada (LabIC.UGR), en colaboración con la Consejería de Fomento, Infraestructuras y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía y con algunas empresas del sector, llevamos años aplicando los conocimientos más avanzados en tecnología y ciencia de los materiales para desarrollar MASAI (Materiales Asfálticos Sostenibles, Automatizados e Inteligentes). Estos materiales permiten mejorar la eficiencia de las tareas de construcción/conservación de carreteras, de manera que se minimice su impacto medioambiental y se adapten a las futuras necesidades de los usuarios y administradores de estas infraestructuras. En el momento de apostar por el salto definitivo a una economía circular y de innovar en los diseños de los futuros proyectos de carreteras, MASAI está demostrado ser una gran oportunidad para la captación de recursos económicos y mejorar el estado y durabilidad de nuestra red de carreteras.

PALABRAS CLAVE: Tecnología de materiales, Economía circular, MASAI, Mezclas asfálticas sostenibles.

ABSTRACT

From the Laboratory of Construction Engineering of the University of Granada (LabIC.UGR), in collaboration with the Department of Development, Infrastructure and Territory Planning of the Regional Government of Andalucía and some companies of the sector, we have been applying the most advanced knowledge in materials science and technologies to develop MASAI (Sustainable, Automated and Intelligent Asphalts Materials). These materials allow the improvement of the efficiency of road construction/maintenance, in order to minimize their environmental impact and support the adaptation to future road users' and administration's needs. In the time of the definitive leap towards circular economy and the promotion of innovation in the design of future road projects, MASAI has shown to be a great opportunity to attract economic resources and improve the condition and durability of our road network.

KEY WORDS: Materials technology, Circular economy, MASAI, Sustainable asphalt pavements.

En las últimas décadas se ha venido produciendo un conjunto de acontecimientos (explosión demográfica, globalización del comercio, aumento de la frecuencia y severidad de los fenómenos climáticos, incremento de coste de las materias primas, aparición de las tecnologías digitales y el IoT, desarrollo de vehículos autónomos, etc.) que ha provocado que el modelo de infraestructura de carretera existente hasta la fecha haya quedado obsoleto. Por este motivo, el reto actual en el sector de la ingeniería de carreteras es implementar soluciones que permitan seguir manteniendo su elevado nivel de prestaciones con un consumo eficiente de los recursos naturales y económicos, y al mismo tiempo, satisfacer las futuras demandas de sus usuarios, promotores y gestores (facilitar el guiado de vehículos autónomos, sistemas de construcción y gestión digitalizados, etc.).

Tradicionalmente, la construcción de firmes de carreteras ha estado regida por un modelo lineal caracterizado por el consumo de materias primas y energía no renovables (áridos, betún, fuel, etc.), la emisión de gases contaminantes durante su producción y el depósito en vertedero de los residuos generados al final de su vida útil. Actualmente, y aunque se trata de un sector maduro, la construcción y conservación de carreteras sigue anclada a este modelo, consumiendo recursos naturales y produciendo residuos que están afectando de manera directa a su productividad.

En base a estas consideraciones, a día de hoy, el sector de la carretera aún cuenta con un amplio margen de mejora para conseguir infraestructuras más eficientes y competitivas; por ende, la transición de un modelo productivo lineal a otro circular y sostenible no solo es una cuestión ambiental, sino también una necesidad imprescindible para garantizar su viabilidad futura. En este sentido, el nuevo modelo deberá también integrar soluciones que permitan dar respuesta al salto generacional reclamado por administradores y usuarios, facilitando el desarrollo de la carretera inteligente conectada y la circulación de vehículos autónomos.

Partiendo de estas premisas, el Laboratorio de Ingeniería de la Construcción de la Universidad de Granada (LabIC.UGR) lleva más

de una década desarrollando soluciones en torno a los tres pilares básicos de la economía circular (minimizar la generación de residuos/emisiones; optimizar la gestión de los materiales, y optimizar la eficiencia energética), que puedan adaptarse para albergar las componentes tecnológicas que permitan el nuevo salto generacional de la carretera.

Estas soluciones son sometidas a los estudios de laboratorio más avanzados, entre los que destacan simulaciones de deterioro por agentes climáticos, la resistencia estructural y a la fisuración por fatiga o los ensayos a escala 1:1. Asimismo, los materiales y tecnologías desarrollados son posteriormente evaluados durante su fabricación, puesta en obra y vida de servicio, proporcionando información real para mejorar el diseño de firmes en base a su durabilidad e impactos ambientales.

Los trabajos realizados a lo largo de estos años han permitido lograr un conjunto de innovaciones como:

- reducción del consumo de áridos naturales a través de su sustitución por subproductos de otras industrias^(i, ii, iii);
- reutilización de elevadas tasas de material fresado en nuevas mezclas bituminosas^(iv);
- valorización de polímeros procedentes de neumáticos fuera de uso o de plásticos para la mejora de las prestaciones mecánicas^(v, vi);
- disminución de las temperaturas de fabricación con la consecuente reducción de gases contaminantes y combustibles fósiles^(vii);
- o el desarrollo de sensores capaces de ofrecer información acerca del estado de la infraestructura y de las características de los vehículos que circulan por ella^(viii).

Estas innovaciones, en colaboración con algunas empresas del sector y gracias al trabajo conjunto con la Consejería de Fomento, Infraestructuras y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía (CFIOT), se han unificado en un material denominado MASAI (Materiales Asfálticos Sostenibles, Automatizados e Inteligentes).



Figura 1. Detalle de algunos de los ensayos realizados en LabIC.UGR para el diseño y desarrollo de MASAI: (a) UGR-FACT; (b) Triaxial; (c) rodadura sumergido; (d) reología; (e) DMA; (f) SATS; (g) ensayos a escala 1:1.



Figura 2. Detalle de algunos de los tramos y trabajos realizados con MASAI hasta la fecha: (a) MASAI (I) A-92 Puerto de la Mora; (b) MASAI (I) A-4028; (c) MASAI (II) A-4026; (d) MASAI (I) A-92 Guadix; (e) Control de evolución de propiedades; (f) control de emisiones en servicio A-92; (g) control de emisiones durante producción.

MASAI es un material que ha sido pensado y diseñado para dar respuesta a las necesidades presentes y futuras de la carretera. Son materiales completamente integrados en los modelos de economía circular y simbiosis industrial que abogan por un autoconsumo de los residuos generados por la carretera, la utilización de residuos/subproductos procedentes de otras industrias locales, la mejora de las prestaciones mecánicas y la durabilidad, y la disminución del consumo energético y emisiones de gases de efecto invernadero. Se caracterizan por ofrecer una mejora en prestaciones mecánicas y durabilidad respecto a las mezclas tradicionales, y por estar fabricados a temperaturas inferiores a los 140 °C, poniendo en valor y/o reutilizando materiales procedentes de residuos y/o de firmes deteriorados, e integrando soluciones que permiten recibir/enviar información para ofrecer diferentes funciones que contribuyan a la mejora en seguridad vial, evaluación de la salud estructural del pavimento, controlar el aforo, velocidad, pesaje, etc.

En base a ello, las principales características que definen un MASAI son:

1. Materiales asfálticos de altas prestaciones mecánicas y funcionales.
2. Producidos a una temperatura máxima de 140 °C.
3. Fabricados con residuos del entorno: fresado procedente de carreteras deterioradas en, al menos, un 20% de su peso y/o subproductos procedentes de otras industrias en, al menos, un 5% de su peso.
4. Modificados en, al menos, un 0,5% de su peso con polímeros reciclados/reutilizados (polvo de neumático, polietileno, polipropileno, etc.).
5. Que integran sensores y/u otros dispositivos capaces de recibir/enviar información para ofrecer diferentes funciones que mejoren la seguridad vial, evalúen su estado de deterioro, aforo y pesaje, etc.

En función del nivel de cumplimiento de estos condicionantes (siendo los dos primeros obligatorios), pueden definirse diferentes grados de MASAI. De esta forma, los materiales que cumplan con las condiciones 1 y 2, y además con la 3 o la 4 (1+2+3 o 1+2+4), serán considerados grado MASAI (I); y si además cumplen con la 5, serán considerados grado MASAI (I+). Por su parte, los materiales que cumplan con las condiciones 1, 2, 3 y 4 (1+2+3+4) serán considerados grado MASAI (II); y si además cumplen con la 5, serán considerados grado MASAI (II+).

Desde 2017 hasta la fecha, estos materiales han sido testados en 6 obras de conservación de firmes sometidos a condiciones de puesta en obra y servicio (tráfico y climáticas) muy adversas. A lo largo de este tiempo, se ha llevado a cabo un exhaustivo control de evolución de sus propiedades mecánicas, superficiales y ambientales, en comparación con otros materiales asfálticos convencionales de control. Los resultados obtenidos están poniendo de manifiesto el elevado potencial que los MASAI tienen para elevar la eficiencia y competitividad de las tareas asociadas a la construcción y conservación de carreteras. Asimismo, en una de estas actuaciones llevada a cabo en la carretera A-308, donde se ejecutó un tramo con mezcla MASAI (II+), también se ha demostrado la viabilidad de disponer de carreteras inteligentes capaces de controlar a tiempo real el aforo de tráfico, su velocidad, carga por eje y la salud estructural del firme.

Tras casi 6 años de intenso trabajo, en la actualidad se han puesto en obra más de 18.550 tn de mezclas MASAI, lo que ha supuesto una contribución sin precedentes en la reutilización de material fresado procedente de pavimentos deteriorados, en la valorización de residuos como el polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso y en la reducción de emisiones de gases contaminantes asociadas a la fabricación de los materiales asfálticos para capa de rodadura. No obstante, otro de los mayores logros de MASAI es haber permitido a la CFIOT la captación de 60 millones de euros procedentes de fondos europeos REACT- EU para la rehabilitación de más de 110 km de autovías (teniendo previsto ejecutarse más de 420.000 Tn de estos materiales entre los años 2022 y 2023), lo que

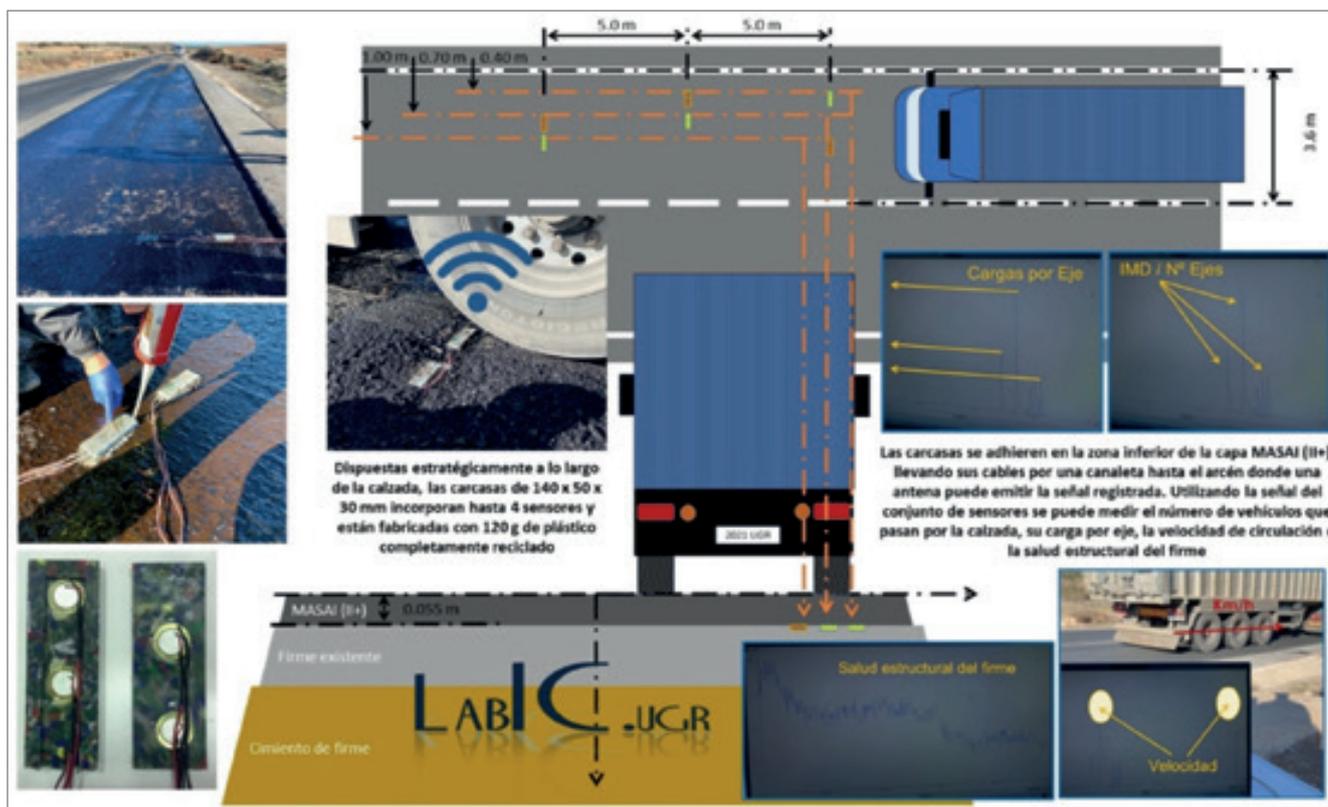


Figura 3. Detalle de los sensores desarrollados por LabIC.UGR para el MASAI, (II+) utilizado en uno de los tramos de la carretera A-308 que actualmente se encuentra en funcionamiento.

supondrá un hito de transferencia e innovación sin precedentes. En momentos en los que se dispone de un presupuesto muy reducido y es tan necesario acometer actuaciones de conservación de pavimentos, los MASAI abren la puerta a una financiación vinculada a la sostenibilidad ambiental y la digitalización.

En los próximos años, LabIC.UGR y la CFIOT seguirán trabajando de manera conjunta y en colaboración con las empresas para seguir estudiando la implementación y control de evolución de estos materiales, y desarrollando innovaciones que permitan incrementar la eficiencia de las actividades de construcción y conservación de carreteras, mejorando su productividad e incentivando nuevas inversiones y el progreso del sector. Con todo ello se pretende que, en un futuro cercano, los MASAI permitan construir y conservar firmes bajo el mínimo impacto medioambiental y adaptados a las futuras demandas impuestas por usuarios y administradores, convirtiéndose de esta manera en los materiales de la próxima generación de carreteras.

Referencias bibliográficas

- I. MC Rubio, F Moreno, A Belmonte, A Menéndez (2010) "Reuse of waste material from decorative quartz solid surfacing in the manufacture of hot bituminous mixes." *Construction and Building Materials* 24 (4), 610-618.
- II. F Moreno-Navarro, M Sol, MC Rubio-Gámez, A Ramírez (2014) "Reuse of thermal power plant slag in hot bituminous mixes." *Construction and Building Materials* 49, 144-150.
- III. F Moreno-Navarro, M Pérez-Martínez, J Martín-Marín, M Sol-Sánchez, MC Rubio-Gámez (2015) "Mechanical performance of asphalt mixes incorporating waste glass." *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 10 (3), 255-261.
- IV. JM Lizárraga, AJ del Barco-Carrión, A Ramírez, P Díaz, F Moreno-Navarro, MC Rubio (2017) "Mechanical performance assessment of half warm recycled asphalt mixes containing up to 100% RAP." *Materiales de construcción* 67 (327), 129.
- V. F Moreno, M Sol, J Martín, M Pérez, MC Rubio (2014) "The effect of crumb rubber modifier on the resistance of asphalt mixes to plastic deformation." *Materials & Design* 47, 274-280.
- VI. LL Brasileiro, F Moreno-Navarro, RT Martínez, M del Sol-Sánchez, MC Rubio-Gámez (2019) "Study of the feasibility of producing modified asphalt bitumens using flakes made from recycled polymers." *Construction and Building Materials* 208, 269-282.
- VII. M Pérez-Martínez, F Moreno-Navarro, J Martín-Marín, C Ríos-Losada, MC Rubio-Gámez (2014) "Analysis of cleaner technologies based on waxes and surfactant additives in road construction." *Journal of cleaner production* 65, 374-379.
- VIII. M Sol-Sánchez, JM Castillo-Mingorance, F Moreno-Navarro, MC Rubio-Gámez (2021) "Smart rail pads for the continuous monitoring of sensed railway tracks: Sensors análisis" *Automation in Construction*, 132, 103950. ■

Carreteras conectadas: un proceso en siete fases

Connected roads: a seven-stages process

Jacobo DÍAZ PINEDA

Director General de la Asociación Española de la Carretera

RESUMEN

La idea de dotar a la red de carreteras de la necesaria conectividad, para que ello pueda suponer un servicio de valor diferencial al ciudadano, debe ser concebida como un proyecto estratégico para el país, con el objetivo principal de mejorar la competitividad, la integración territorial, la calidad del servicio y la sostenibilidad de la movilidad por carretera por medio de su digitalización y conectividad, de manera que se puedan generar y optimizar servicios de movilidad de pasajeros y mercancías que permitan materializar las políticas de movilidad conectada, segura y sostenible.

La consecución de todo ello permitiría obtener una gestión inteligente de las infraestructuras, preparar la futura automatización de la movilidad, así como fortalecer procedimientos y servicios de la Administración Pública.

Asimismo, se permitiría acelerar la implantación de un nuevo modelo de movilidad acompañado a los avances del sector de la automoción, evitando la relegación del papel de las infraestructuras de carreteras a un simple proveedor de una plataforma física y permitiendo la generación de servicios de valor añadido.

PALABRAS CLAVE: Carretera conectada, Digitalización, Movilidad, Automatización.

ABSTRACT

Providing connectivity to the road network, so that it serves as an added value service for the citizens, should be considered as a strategic project for our country. With the aim of improving competitiveness, territory integration, quality of service and sustainability of road mobility, by means of digitalization and connectivity, mobility services for passengers and freight will be created and optimized, allowing the implementation of policies for connected, safe and sustainable mobility.

Connectivity would also allow the intelligent management of road infrastructure, preparing it for the future automation of mobility, as well as strengthening the procedures and services of the public administration.

In addition, it would allow the acceleration of the implementation of a new mobility model in accordance with the vehicle manufacturers sector, ensuring that infrastructures are not only a simple provider of a physical platform, but also an enabler for added value services.

KEY WORDS: Connected road, Digitalization, Mobility, Automation.

Carreteras conectadas: un proceso en 7 fases

Las actividades previstas para la consecución de este ambicioso objetivo se detallan en la Figura 1 y se concretan en las 7 fases siguientes:

1. Programa de adaptación física de la red para la movilidad conectada y autónoma

En este primer apartado -nótese que a todos los efectos se refiere a la red de gran capacidad del país-, se establecerá un programa de adaptación de la infraestructura física para ajustarla a los diferentes niveles de la futura conducción autónoma y a la convivencia con vehículos de conducción convencional.

Esta adaptación impactará sobre la infraestructura viaria a muchos niveles: características de la carretera (geometría, número de carriles, marcas viales...), intersecciones y accesos, señalización y otro equipamiento viario, condiciones de conducción (por ejemplo, rangos de velocidad, grados de decisión...), estado de conservación, etc. Asimismo, se tendrá en cuenta otro tipo de necesidades específicas para la conducción conectada y autónoma, como zonas de parada, carriles adaptativos, tramos dedicados, etc.

En este apartado de adaptación física del corredor, se considera, pues:

1. La mejora de la señalización vertical y horizontal, el balizamiento y la mejora puntual del paquete de firme en la vía, según estimaciones de la inspección visual de carreteras que realiza la Asociación Española de la Carretera periódicamente.
2. La necesidad de dotación de paradas de emergencia cada 10 km, en ambos sentidos.
3. Los oportunos sistemas de control de acceso en las carreteras que conectan con cada itinerario.

2. Programa de adaptación digital de la red de carreteras

En este marco, se plantean actuaciones concretas sobre cada itinerario en los siguientes aspectos:

- Sensorización del entorno de la vía para recogida de información en tiempo real sobre la situación en cada momento, incluyendo sensores avanzados que ofrezcan esta funcionalidad (sensorización cooperativa para altos niveles de automatización).
- Despliegue de tecnologías de comunicación que permitan el intercambio de información entre la carretera y los vehículos, y entre la administración y la vía.
- Servicios cooperativos de información a los vehículos C2X, como, por ejemplo, señales de tráfico, información de gestión de tráfico, recomendaciones del centro de gestión, información de eventos excepcionales en la carretera, etc.
- Servicios cooperativos avanzados: sensorización cooperativa, posicionamiento preciso,...

En resumen, para la adaptación digital del corredor, se ha considerado:

1. La instalación de equipos específicos (RSU, *Road Side Units*) en el entorno de la carretera, en todo el itinerario, cada 10 km y en ambos sentidos, garantizando la máxima cobertura.
2. La dotación de red de comunicaciones 5G a todo el itinerario, mediante torres específicas ubicadas cada 10 km.
3. La conversión digital de la información analógica registrada por los sensores de la carretera.



Figura 1. Actividades del proceso de digitalización de carreteras (fuente: elaboración propia).



3. Programa de generación de servicios y modelos de movilidad avanzada

La digitalización de las infraestructuras viarias facilita la creación de nuevos servicios de movilidad y la mejora de los existentes. Para ello, se plantea la creación de plataformas digitales de gestión de servicios cooperativos que se establezcan en cada unidad territorial. Se ha previsto el despliegue de plataformas en todas las provincias de las comunidades autónomas atravesadas, de manera que se pueda dar servicio a los usuarios, no sólo en el itinerario, sino también teniendo en cuenta las posibilidades de escalabilidad a las redes viarias autonómicas y provinciales de diferente nivel.

En este sentido, se considerarán los diferentes grupos de servicios de movilidad que potencialmente podrán ser desplegados en el futuro, como: servicios cooperativos, servicios multimodales, Mobility as a Service (MaaS) o aquéllos que pudieran surgir.

Para todo ello, se deberán desarrollar:

1. Plataformas digitales de servicios cooperativos C-ITS.

4. Despliegue de “living-labs” (ensayos a escala real en la red)

Con el fin de llevar a cabo estos “living-labs”, se propone:

- Trabajar en la identificación de diferentes zonas que permitan cubrir la variabilidad de las características y elementos singulares considerados en un proyecto de esta envergadura.
- Desarrollar un plan de prueba y demostración en los diferentes “living-labs” seleccionados, identificando casos de uso a demostrar en cada zona y datos a recoger para un posterior análisis.
- Adaptación e instalación de las soluciones propuestas en los “living-labs” con el fin de poder llevar a cabo pruebas y demostraciones.
- Análisis de resultados de pruebas realizadas en los “living-labs” y conclusiones.

Se ha previsto la puesta en marcha de 5 “living-labs”, que podrían focalizarse en los siguientes ámbitos:

1. Movilidad autónoma niveles 4 y 5, con o sin segregación de tráfico.
2. Provisión de sensores específicos de gestión avanzada de la movilidad.
3. Modelo automático de control de fronteras sin barrera.

4. Gestión integral de la movilidad segura en túneles.

5. Comparativa de modelos de pago por uso de infraestructuras.

5. Programa de creación de las infraestructuras de almacenamiento e intercambio seguro de datos

Se debería crear una plataforma digital de soporte basada fundamentalmente en tecnologías de Big Data e Inteligencia Artificial, donde se definiría como pieza principal un gran *Data Lake* que albergue la información estática y dinámica de todos los niveles de información (movilidad y tráfico, información viaria, información de los sensores de la propia infraestructura, etc.).

La seguridad e integridad tienen que ser valores esenciales de la plataforma y deberán implementarse todos los mecanismos de ciberseguridad que garanticen la invulnerabilidad de la misma frente a las crecientes amenazas en este ámbito.

Por último, la plataforma deberá ser accesible y robusta, así como escalable, para poder atender con eficiencia la variabilidad de la demanda. Por ello, se avanza el modelo *Cloud Computing* como la mejor alternativa para su provisión.

Por tanto, los aspectos que debe incorporar este apartado son:

1. Desarrollo de Inteligencia Artificial y *Data Lake* como repositorio de datos en bruto.
2. Almacenamiento *Cloud* escalable.
3. Creación de plataforma de servicios IoT.
4. Diseño de la analítica y cuadro de mando (*dashboarding*).

6. Programa de digitalización de la administración de carreteras

Para avanzar en los próximos años en la transición digital en el sector de la carretera, se deberá trabajar al menos en tres ejes estratégicos que son claves para la modernización de la Administración:

- Integración de sistemas:

Los objetivos principales que una administración de carreteras debe alcanzar en este proceso son la tramitación electrónica, un archivo digital documental, implantación de nuevos sistemas de información y visor GIS. Por lo tanto, el objetivo será el desarrollo de las soluciones que permitan integrar la información geográfica de la red de carreteras con la información de

las actuaciones y expedientes en una única plataforma de consulta, y cuyas innovaciones funcionales sean reutilizables por los sistemas que se desarrollen en el ámbito de la gestión de carreteras.

- Digitalización del Dominio Público Viario y zonas de limitación de la propiedad:

En general, la documentación relativa al dominio público viario de una red de carreteras se encuentra, en un porcentaje muy importante todavía, en formato papel. Para subsanar esta situación, se debe iniciar y completar un proceso de digitalización del dominio público viario y de las actas de expropiación disponibles de todas las carreteras bajo la competencia de la administración.

- Digitalización de la red de carreteras:

Conseguir asociar cualquier dato viario a unas coordenadas geográficas permite hacer un análisis geoespacial profundo, empleando técnicas de geo-procesamiento y geo-estadística, incorporando elementos del entorno territorial o elementos viarios próximos al punto analizado, que pueden aportar mayor grado de información en el análisis. Esto permite mejorar la productividad y facilitar la gestión de la propia infraestructura.

En definitiva, los hitos de este apartado se pueden resumir en:

1. Integración de sistemas y protocolos de intercambio de datos.
2. Digitalización documental del dominio público viario.
3. Digitalización HD de la totalidad de la red de carreteras.

7. Programa de mejora continua de la formación de los técnicos gestores

Con vistas al máximo aprovechamiento del sistema, es preciso poner en marcha un plan de formación del personal de la administración, de modo que se garantice el acceso a la información, se pueda mantener el sistema operativo en el tiempo y se optimice su potencialidad.

Para ello, se deberá incidir en la formación *on line* de todo el personal técnico y administrativo de la administración gestora, pero además, se profundizará en formar al personal que desempeña las tareas de explotación de la carretera para que pueda disponer de toda la información cuando está trabajando en campo, y sea capaz de mantener esta información actualizada en todo momento.

Todo ello se articulará a partir de un programa específico:

1. Programa de formación de técnicos de la administración.



Aplicación de la propuesta al corredor Madrid-Lisboa

Si bien la Asociación Española de la Carretera ha evaluado el importe de la aplicación de este proceso en 7 fases a toda la red de carreteras de gran capacidad del país -estimaciones que serán presentadas en sucesivos artículos-, nos ha parecido oportuno esbozar un resumen de lo que implicaría su aplicación a un itinerario en concreto.

En este sentido, el corredor que nos ha parecido más representativo, pensando en su compatibilidad con las directrices del programa europeo "Next Generation Europe" y el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia "España Puede", es el trayecto Madrid-Lisboa.

Así, el proyecto en su globalidad supondría una inversión, en un escenario conservador, de aproximadamente unos 100 millones de euros. Un 66% para el itinerario en territorio español, y un 33% para el tramo portugués.

En grandes epígrafes, se puede destacar que un 40% de la inversión se corresponde con la adaptación y mejora física de la carretera (fase 1); un 45% se corresponde con las inversiones en adaptación digital, creación de la plataforma C-ITS y gestión de "living-labs" y almacenamiento y gestión de datos (fases 2 a 5); y el 15% restante se debe dedicar al apartado de formación y digitalización de las administraciones y sus redes carreteras (fases 6 y 7). ■

Sistema Seguro: nuevo enfoque con el usuario como protagonista

Safe System: a new approach with the user as main character

Ana Luz JIMÉNEZ ORTEGA

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe Provincial. Coordinadora de la DGT en Andalucía, Ceuta y Melilla

RESUMEN

Las sociedades avanzadas exigen de sus responsables la adopción de políticas públicas de mejora de la seguridad vial que sean eficientes, porque ya no es asumible que las personas resulten fallecidas o heridas gravemente como consecuencia de los accidentes de circulación. Este mandato se materializa en la Estrategia de Seguridad Vial 2021-2030 en España y asume la aplicación del Sistema Seguro.

En el presente artículo se desarrollan las líneas generales del Sistema Seguro definido en la Estrategia española, con especial atención al protagonismo del factor humano y el factor vía dentro de ese sistema, refiriendo algunas actuaciones y soluciones aplicadas en España u otros países.

PALABRAS CLAVE: Sistema Seguro, Seguridad Vial, Accidentes de Tráfico, Movilidad.

ABSTRACT

Advanced societies demand to their managers the adoption of efficient public policies to improve road safety, as it is no longer acceptable that people are killed or seriously injured as a result of accidents. This mandate is included in the Spanish Road Safety Strategy 2021-2030 and assumes the application of the Safe System approach.

In this article, we develop the main lines of the Safe System approach defined in the Spanish Strategy, with special attention to human factor and infrastructure within the system, while also describing some actions and solutions applied in Spain or other countries.

KEY WORDS: Safe Systems, Road Safety, Accidents, Mobility.

Introducción

El movimiento, desplazarse de un lugar a otro, es una actividad intrínsecamente humana, inherente a nuestra condición y desarrollo y que ha ido evolucionando a lo largo de los tiempos. Esta movilidad –y sus distintos modos y motivaciones– implica aspectos muy positivos –desarrollo social y económico, cultural, progreso, salud, bienestar social...–, pero también presenta aspectos negativos, como los accidentes, la congestión y la contaminación.

La madurez actual de la sociedad implica que le resulte intolerable la pérdida de vidas en accidentes de circulación y las lesiones y secuelas que afectan a quienes sobreviven, por lo que la movilidad segura, en primer lugar, es una exigencia que las administraciones y la propia sociedad se imponen como innegociable, y las políticas públicas han de dar una respuesta adecuada al respecto, que en España se recoge en la Estrategia de Seguridad Vial 2021-2030, recientemente presentada en el Consejo Superior de Tráfico, Seguridad Vial y Movilidad. En este artículo se resumen las líneas fundamentales del Sistema Seguro en España recogidas en esta Estrategia.

¿Qué se entiende por sistema seguro?

La Estrategia de Seguridad Vial 2021-2030 dedica uno de sus capítulos a definir el concepto de Sistema Seguro, que tiene su origen en experiencias internacionales como la Seguridad Sostenible de los Países Bajos, formulada por primera vez en 1992, o la Visión Cero de Suecia, aprobada por el parlamento de ese país en 1997⁰.

Y en ella se recoge que, desde entonces, muchos países, regiones y ciudades, así como la práctica totalidad de los organismos internacionales relevantes –Naciones Unidas, Organización Mundial de la Salud, Foro Internacional del Transporte, Unión Europea...–, han utilizado el Sistema Seguro como punto de partida.

En España se ha asumido que el Sistema Seguro consta de tres componentes: una visión, una serie de principios y un conjunto de herramientas para desarrollar ambos.

La visión

La visión adoptada en España se alinea con el objetivo de la Comisión Europea que establece que, en 2050, en las calles y carreteras europeas deberían registrarse cero fallecidos y heridos graves como consecuencia de accidentes de circulación, en línea, asimismo, con la Visión Cero sueca, que establece esta visión como un objetivo ético y universal de las actuaciones de todos los implicados en el sistema de la movilidad. La seguridad del sistema no es negociable frente a otros aspectos, como, por ejemplo, la movilidad, y con ello se introduce otra consideración en esta visión: se asume que los accidentes ocurren, pero es inadmisibles que tengan como consecuencia el fallecimiento o las heridas graves en las personas.

Los principios

Respecto a los principios del Sistema Seguro, la aproximación que se ha fijado en España se basa en las conclusiones obtenidas por el Foro Internacional de Transporte⁰ sobre los principios comunes que debían regir un sistema seguro, y que se enumeran:

- **Principio de falibilidad:** las personas cometen errores que pueden provocar accidentes.
- **Principio de vulnerabilidad:** el cuerpo humano tiene una capacidad limitada de tolerar la fuerza de un impacto sin que se produzcan lesiones.
- **Principio de responsabilidad compartida:** existe una responsabilidad compartida entre quienes diseñan, construyen, gestionan y usan las carreteras y vehículos, así como quienes proporcionan la respuesta después del accidente.
- **Principio de enfoque integral o de redundancia:** todas las partes del sistema deben ser reforzadas para multiplicar sus efectos, de forma que, si una de las partes falla, las personas continúen protegidas.

1. Conceptos clave en el Sistema Seguro

Resulta muy interesante la identificación que realiza el Foro Internacional de Transporte de la proactividad como concepto clave en un sistema seguro de éxito. El enfoque proactivo implica analizar lo que ha ocurrido en el pasado para evitar que lo negativo vuelva a ocurrir en el futuro, y también implica que sean revisados los conceptos de causa de los accidentes y responsabilidad de los mismos.

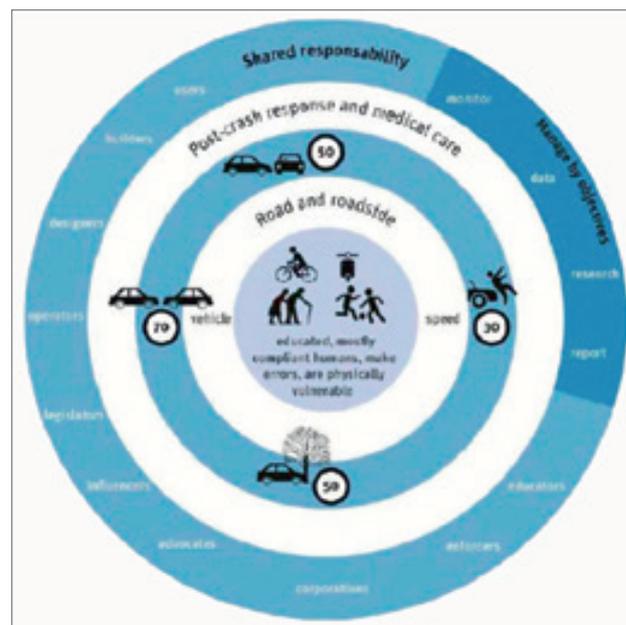


Figura 1. Las personas, centro del Sistema Seguro. Fuente: Zero Road Deaths and Serious Injuries. Leading a Paradigm Shift to a Safe System. 2016, ITF.

Asumir el concepto de Sistema Seguro implica que los errores previos que han desembocado en la producción del accidente sean vistos como consecuencia del diseño del sistema.

Si se atiende a los tres elementos básicos que intervienen en la movilidad –los vehículos, los conductores y la vía por la que se desarrollan los desplazamientos–, un enfoque frecuente y limitado ha sido el de encontrar la causa de los accidentes fundamentalmente en el comportamiento, infracciones o errores cometidos por las personas implicadas. Pero no se debe buscar culpables, se debe buscar soluciones.

Asumir el concepto de Sistema Seguro implica que los errores previos que han desembocado en la producción del accidente sean vistos como consecuencia del diseño del sistema, y lleven al planteamiento y búsqueda de respuestas para las siguientes cuestiones: ¿Cómo se hubiera evitado el accidente o mitigado sus consecuencias? ¿Qué factores con su presencia o ausencia habrían evitado el accidente, reducido su probabilidad de ocurrencia o minimizado sus consecuencias?

Y las respuestas a estas preguntas involucran a todos los implicados en el sistema.

Es decir, para analizar en toda su amplitud un accidente de circulación que se ha producido, se ha de revisar el papel de todos y cada uno de los actores involucrados que, con acciones distintas, hubieran podido evitar el accidente o sus consecuencias negativas. Esto incluiría, según se recoge en la propia Estrategia, por ejemplo, “a las administraciones responsables de las normas sobre tráfico, vehículos y carreteras; los responsables de la fabricación de vehículos y de la construcción y mantenimiento de las vías; las policías responsables de la vigilancia de los comportamientos de riesgo o las empresas que, con su política de seguridad vial laboral, determinan las condiciones de desplazamiento de sus trabajadores. Las personas implicadas en el accidente son, por supuesto, también responsables, pero el Sistema Seguro parte del hecho de que el resto de actores tiene una capacidad de influencia en general superior. Es por ello por lo que se afirma que, en el Sistema Seguro, la responsabilidad debe buscarse aguas arriba. El objetivo último del Sistema Seguro es que la ocurrencia de accidente dependa lo menos posible de las decisiones individuales de las personas”.

Las herramientas

Existe un amplio grado de homogeneidad en los distintos países y regiones respecto a la visión y principios del Sistema Seguro, sin embargo, aparece un mayor grado de heterogeneidad respecto a las herramientas para desarrollarlos, que puede tener su justificación en las diferencias en los distintos territorios. Por ello, parece que el Sistema Seguro ha de tener principios universales y soluciones locales.

Las herramientas que contempla el Sistema Seguro en España son, fundamentalmente, aquellas que permiten o bien la eliminación del riesgo mediante elementos físicos, o bien la minimización del número de situaciones en las que se presenta el riesgo o la mitigación de sus consecuencias, para llegar a una formulación compartida sobre las soluciones a aplicar en España, centrandó este artículo en las referentes a dos grupos fundamentales:

1. Sistema Seguro y factor humano

Se trata del factor esencial del Sistema Seguro, ya que su visión establece que se ha de evitar, por completo, que ninguna persona que participe en la movilidad pueda resultar muerta o herida grave. Es decir, asumir el Sistema Seguro implica que los seres humanos están en el centro del sistema de movilidad y transporte, independientemente del papel que ocupen en el mismo –conductores, pasajeros, peatones, etc.– y de sus propias singularidades y características –usuarios vulnerables, mayores, etc.–.

El Sistema Seguro asume que, como norma general, los usuarios de las vías públicas en sus desplazamientos conocen las normas que los regulan, pero pueden cometer errores y algunos de esos errores desembocarán en la producción de accidentes, lo que lleva al primer principio del Sistema: la falibilidad de las personas.

¿Y cómo se puede anular o minimizar esta falibilidad de las personas? Se podría intentar compensar esos errores con otros ele-

mentos del sistema, pero en ningún caso esta compensación a través de los vehículos, la vía o la propia tecnología, anula o diluye la responsabilidad de la persona, ya que implicaría renunciar al tercer principio ya enunciado, que es el de la responsabilidad compartida, y supondría una visión parcial y limitada del sistema.

Por tanto, resulta imprescindible trabajar en los Usuarios Seguros, que serán aquellos conductores, peatones o acompañantes que transitan por las vías públicas y que han de estar suficientemente formados, educados y sensibilizados para evitar los factores de riesgo o errores que pueden desencadenar la producción de un accidente. Y no se puede olvidar que la educación, formación y motivación han de ser trabajadas en todas las etapas de la vida –niños, jóvenes, adultos, ancianos...– y para los distintos roles que se ocupan, que pueden ser múltiples y sucesivos en un corto espacio de tiempo –peatón, conductor, usuario de transporte público, acompañante, etc.–.

Se ha producido un progreso importante en esta materia en los últimos años, con la introducción, por ejemplo, de los exámenes de calidad para acceder al permiso de conducir, el establecimiento del sistema del permiso por puntos, la actualización y profesionalización de los profesores que imparten formación vial, el trabajo con colectivos específicos con discapacidad para permitir el ejercicio de su derecho a la movilidad, una formación específica para todos los conductores que tenga en cuenta la protección a los usuarios vulnerables, la introducción de cursos de conducción segura en la última reforma de la Ley de Tráfico⁽¹⁰⁾, la incorporación en la Ley de Educación en trámite de contenidos obligatorios de seguridad vial, etc. En definitiva, se ha avanzado de manera muy sustancial en la mejora de los comportamientos, pero se ha de seguir profundizando para evitar o minimizar esos errores humanos.

Por último y en relación al factor humano, especial atención se debe prestar a la formación y capacitación continuas también de otros actores de la seguridad vial, profesionales en la mayoría de los casos, como los responsables del diseño, construcción y mantenimiento de las infraestructuras y los vehículos, los técnicos en seguridad vial, los responsables de la gestión del sistema, los responsables de la normativa, los encargados de la educación y formación vial, o los profesionales sanitarios y de emergencias. Para todos ellos, la formación suele ser académica en un principio, pero no debe limitarse a ello y debe incluir actividades como cursos de especialización y actualización, congresos o foros de intercambio de experiencias, y esto nos lleva al siguiente factor a considerar que se desarrolla en este artículo, el factor vía.



Figura 2. Distribución de los Centros de Gestión de Tráfico - España. Fuente: Dirección General de Tráfico.

2. Sistema Seguro y la vía

De los tres factores fundamentales que intervienen en la movilidad y el transporte –factor humano, vehículo y vía–, este último quizás sea el que haya permanecido más invariable –no ha habido una modificación sustancial de la normativa de aplicación general en España–, pero está evolucionando enormemente en los últimos tiempos y presenta una gran potencialidad para cobrar protagonismo en el desarrollo del Sistema Seguro.

Partiendo de la base de que, ante la existencia de un riesgo cierto y constatable, y como ya se ha indicado, el Sistema Seguro va a tratar de eliminar dicho riesgo mediante elementos físicos o minimizar el número de ocasiones en las que pueda presentarse o mitigar sus consecuencias, han aparecido propuestas y diseños muy interesantes y eficientes, tanto desde el punto de vista de la seguridad vial, como del coste económico y medioambiental que presentan.

Las versiones de Sistema Seguro existentes en distintos países difieren en su utilización de estas tres opciones; por ejemplo, ante el riesgo de colisión frontal que supone el tráfico en carreteras convencionales, la Visión Cero sueca ha adoptado fundamentalmente un enfoque de eliminación, con las carreteras 2+1 y las barreras de separación de sentidos, mientras que la seguridad sostenible neerlandesa se basa en un enfoque de mitigación, con un límite de velocidad de 60 km/h en la mayoría de la red convencional.

En España, en marzo de 2021 se aprobó por parte del MITMA la primera norma española sobre carreteras 2+1⁽¹¹⁾, que desarrolla uno de los principios del Sistema Seguro, evitar el riesgo, en este caso de colisiones frontales, mediante la ejecución de barrera física y habilitación alternativa de zonas de adelantamiento. Existen ya sistemas 2+1 implantados en España –por ejemplo, en la C-55 o C-58 en Barcelona– y hay varios de ellos en proyecto en Andalucía.



La infraestructura es el factor que presenta la mayor potencialidad para asumir los fallos humanos con mayor eficiencia desde el punto de vista de la seguridad vial.

Asimismo, el Sistema Seguro asigna gran importancia a la innovación y la tecnología, especialmente en lo relativo a soluciones transversales que afecten, no solo a la seguridad vial, sino también a otros impactos relacionados con la movilidad, la salud o el medio ambiente. Los sistemas inteligentes de transporte –ITS– como herramientas para la gestión de una circulación más segura, se convierten en soluciones esenciales para incrementar la eficiencia del sistema. El papel de los Centros de Gestión de la Dirección General de Tráfico y autoridades autonómicas en su caso, resulta esencial para la puesta en marcha de esta herramienta, que incide especialmente en el principio de enfoque integral o de redundancia, ya que permite reforzar todas las partes del sistema para multiplicar sus efectos.

Otra herramienta aplicada en España respecto al factor vía es la recogida en la Estrategia-T publicada por la Dirección General de Tráfico^(M), donde se recoge la necesidad de adaptar la infraestructura y el entorno en un lugar de especial complejidad como son las travesías, considerando e integrando todos los actores, intereses, usos y posibilidades de este espacio público. La aplicación de esta herramienta permite, mediante la adaptación del entorno, transmitir al usuario cuáles son las acciones permitidas, quiénes son los usuarios más vulnerables a los que hay que proteger, qué papel juega cada actor cuando se desplaza por ese entorno, qué riesgos pueden aparecer, etc., y, por tanto, posibilita reforzar el comportamiento seguro de todos los intervinientes.

Finalmente, es necesario hacer una mención expresa a un nuevo concepto que

aparece relacionado con el Sistema Seguro y la vía, que es el de velocidad segura. Según se recoge en la propia Estrategia, con la adopción del Sistema Seguro, el equilibrio entre movilidad y seguridad con el que se establecen los límites de velocidad pasa a ser sustituido por el concepto de velocidad segura, definida como aquella que, en caso de accidente, asegura que la probabilidad de lesiones a las personas implicadas no supere un determinado umbral. En la práctica, este valor viene definido por el punto de inflexión en el cual la curva de probabilidad de sufrir lesiones graves

ESCENARIO (Vía/Usuarios)	TIPO DE CONFLICTO (ejemplos)	VELOCIDAD MÁXIMA recomendada (km/h)	
Vías urbanas con posibles conflictos entre vehículos motorizados y colectivos o medios vulnerables.	Entre vehículos motorizados y colectivos o medios vulnerables.	30	Genérica.
		20	Zonas de convivencia intensa entre vehículos motorizados y colectivos o medios vulnerables.
Vías urbanas o periurbanas con segregación y protección completa para colectivos o medios vulnerables, incluso en los cruces (aceras, carriles bid., pasos peatonales, etc.), pero con riesgo de impactos laterales entre vehículos motorizados en intersecciones.	Entre vehículos motorizados (impacto lateral).	50	
Carreteras sin separación central entre sentidos que impida los impactos frontales.	Entre vehículos motorizados (impacto frontal) Entre vehículos motorizados y colectivos o medios vulnerables.	80	Genérica.
		70	Puede ser necesaria en carreteras frecuentadas por peatones o bicicletas.
Carreteras con protección que impida impactos frontales o laterales entre vehículos motorizados, pero que tienen otros factores de riesgo (p.e., elevado volumen de tráfico).	Entre vehículos motorizados.	100	
Autopistas y autovías con todos los estándares de seguridad ("state of the art motorways").		120/130	

Tabla 1. Velocidades seguras. Fuente: *Conclusions of the Executive Seminar on Speed and Speed Management*. 2020, CE.

La velocidad segura es aquella que, en caso de accidente, asegura que la probabilidad de lesiones no supere un determinado umbral.

empieza a aplanarse, curva que es diferente para cada escenario de posible conflicto entre usuarios y que ha sido estudiada por diversos autores. Un resumen reciente de los valores generalmente aceptados como velocidades seguras en los escenarios habituales en los distintos tipos de vías lo encontramos en el seminario sobre gestión de la velocidad celebrado en 2020 por la Comisión Europea⁽⁶⁾, según se recoge en la Tabla 1.

Conclusiones

España adopta una decisión esencial para la mejora de la seguridad vial en las vías públicas al asumir como estrategia de seguridad vial para 2021-2030 la implantación del Sistema Seguro, que aporta un planteamiento muy innovador y compartido con otros países: Los accidentes de circulación se van a seguir produciendo, porque el protagonista del sistema, la persona, es fallible, comete errores y toma decisiones equivocadas. Sin embargo, la sociedad no está dispuesta a tolerar que si una persona comete alguno de esos errores, tenga necesariamente que pagar con su vida o con graves secuelas físicas estos fallos. El sistema ha de ser capaz de asumir los errores humanos y evitar la producción del accidente, eliminando el riesgo, minimizando el número de situaciones en que pueda aparecer o mitigando sus consecuencias.

El factor humano, al estar la persona en el centro de sistema, resulta esencial para lograr que el sistema sea seguro, y se han implantado medidas y soluciones que han incidido de manera muy importante en la mejor formación y educación de los usuarios del sistema. Pero es necesario seguir profundizando en esa mejora de las capacidades y la motivación para que los usuarios de las vías públicas sean Usuarios Seguros.

Por último, se destaca la enorme capacidad transformadora para alcanzar el Sistema Seguro que ofrece la aplicación de distintas soluciones sobre la infraestructura para eliminar o minimizar los riesgos y paliar las consecuencias de los mismos, y es el factor que presenta la mayor potencialidad para asumir los fallos humanos con más eficiencia desde el punto de vista de la seguridad vial, pero también con eficiencia medioambiental, económica y del sistema de transporte.

Referencias bibliográficas

- I. SUECIA, PARLAMENTO SUECO (SVERIGES RIKSDAG), 22 de mayo de 1997. Proposición 1996/97:137. La Visión Cero. Disponible (solo en sueco) en: www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/proposition/nollvisionen-och-det-trafiksakra-samhallet_GK03137
- II. INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM, OECD, 2016, Zero Road Deaths and Serious Injuries. Leading a Paradigm Shift to a Safe System. ISBN 978-92-82-10805-5. Disponible en: www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/zero-road-deaths.pdf
- III. BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO, 21 de diciembre de 2021: Ley 18/2021, de 20 de diciembre, por la que se modifica el texto refundido de la Ley sobre Tráfico, Circulación de Vehículos a Motor y Seguridad Vial, aprobado por el Real Decreto Legislativo 6/2015, de 30 de octubre, en materia del permiso y licencia de conducción por puntos. Disponible en: www.boe.es/eli/es/l/2021/12/20/18
- IV. MINISTERIO DE TRANSPORTES, MOVILIDAD Y AGENDA URBANA. ORDEN CIRCULAR 1/2021, Recomendaciones para el diseño de carreteras 2+1 y carriles adicionales de adelantamiento. Disponible en: www.mitma.gob.es/carreteras/normativa-tecnica/06-trazado
- V. DIRECCIÓN GENERAL DE TRÁFICO (MINISTERIO DEL INTERIOR). Estrategia T. Un nuevo marco para abordar el tratamiento de las travesías. Disponible en: www.dgt.es/export/sites/web-DGT/.galleries/downloads/conoce_la_dgt/que-hacemos/conocimiento-e-investigacion/14_Libro-ESTRATEGIA-T_DGT-baja-resolucion.pdf
- VI. UNIÓN EUROPEA, COMISIÓN EUROPEA y Transport Area of the Florence School of Regulation, 2020. Conclusions of the Executive Seminar on Speed and Speed Management. Disponible en: https://ec.europa.eu/transport/road_safety/conclusions-executive-seminar-speed-and-speed-management_en ■

Adaptación de las carreteras al clima

Adaptation of roads to climate

Elena DE LA PEÑA GONZÁLEZ

Subdirectora General Técnica. Asociación Española de la Carretera.

RESUMEN

La adaptación de las carreteras a la variabilidad y cambio climáticos tiene como objetivo prever los efectos adversos del clima y tomar las medidas adecuadas para evitar o minimizar los daños que puedan causar. Taludes, drenaje, estructuras y pavimentos son los elementos más afectados, a los que se debe prestar atención a través de diferentes medidas a lo largo de todo el ciclo de vida en distintos ámbitos, como la vigilancia y control, mejora de normativa, actuaciones específicas en las vías más vulnerables, etc.

PALABRAS CLAVE: Cambio climático, Adaptación, Resiliencia, Clima.

ABSTRACT

The purpose of adapting roads to climate variability and change is to anticipate the adverse effects of the climate and take the appropriate measures to avoid or minimize the damage they may cause. Slopes, drainage, structures and pavements are the most affected elements; they should be carefully considered during the entire road life cycle, in areas such as supervision and control, improvement of technical regulation, specific actions in the most vulnerable road sections, etc.

KEY WORDS: *Climate change, Adaptation, Resilience, Climate.*



Carreteras y clima

Siempre ha existido una estrecha relación entre el clima y las carreteras; sin embargo, los cambios que se están produciendo hacen que los datos climáticos históricos que se han utilizado hasta la fecha puedan no ser suficientes para una adecuada gestión de la infraestructura actual. Esto es especialmente crítico en algunas regiones del planeta, como Asia o América Latina y Caribe, donde los fenómenos climáticos extremos son cada vez más frecuentes; así, se pone de manifiesto que si la planificación y el diseño de las carreteras se siguen realizando tan solo ateniendo a las prácticas habituales de ingeniería en estas regiones y a la información histórica existente, es muy probable que no sea posible dar respuesta a los eventos climáticos que se vienen sucediendo en los últimos años y que, previsiblemente, continuarán en el futuro (CAF - banco de Desarrollo de América Latina, 2018).

En Europa, si bien los fenómenos climáticos extremos son menos recurrentes que en otras regiones del mundo, se han registrado en los últimos años episodios que han generado un fuerte impacto en las infraestructuras. Por ejemplo, el verano de 2021 varios países del centro de Europa, como Países Bajos, Alemania, Bélgica o Austria, sufrieron lluvias devastadoras que produjeron más de 200 fallecidos y graves daños en poblaciones e infraestructuras.



Foto 1. Cierre total de la vía Santa Cecilia – Puerto Rico debido a un derrumbe en Colombia (Fuente: Instituto Nacional de Vías de Colombia).

Necesidad de adaptación

Si bien numerosos países del mundo han desarrollado políticas para la mitigación del cambio climático, las estrategias de adaptación no están tan generalizadas. En particular, en el caso de las carreteras, la mayor parte de las medidas se enmarcan en la mitigación, y van orientadas a reducir los gases de efecto invernadero que genera el tráfico a través de mejoras en el parque, medidas de gestión de la demanda, trasvase de tráfico a modos menos contaminantes, etc. En el ámbito de la adaptación de las carreteras al cambio climático, las estrategias y acciones son, en general, muy incipientes.

Los niveles de riesgo frente al cambio climático están condicionados por la exposición al riesgo, la vulnerabilidad y la capacidad de adaptación. El establecimiento de medidas de adaptación debe considerar tanto los nuevos proyectos de carreteras como la red existente, cuya representatividad en la longitud de la malla viaria total es muy superior a la de los nuevos diseños.

A la hora de plantear medidas de adaptación de las carreteras al clima, existen requisitos sobre la información de la que es necesario disponer: caracterización de la red, previsiones climáticas particularizadas, amenazas para la red vial, diagnóstico de vulnerabilidad, análisis de riesgo, identificación de puntos críticos y valoración de daños previstos si no se actúa.

Marco europeo y español

En diciembre de 2019 la Comisión Europea anunciaba el “Pacto Verde Europeo” (*Green Deal*), compromiso para convertir Europa en el primer continente climáticamente neutro en el año 2050; para ello, se han previsto numerosas acciones y planes orientados a proteger el entorno y potenciar la economía verde. Asimismo, la Comisión Europea focaliza sus actividades para combatir el cambio climático a través de la Dirección General de Acción por el Clima (DG CLIMA); en el ámbito del transporte por carretera, los esfuerzos se centran en la elaboración de normas para mejorar la eficiencia de los vehículos y la calidad de los combustibles, así como en la descarbonización de las infraestructuras.

En 2013, la Comisión Europea adoptó la Estrategia Europea de adaptación al Cambio Climático con el propósito de conseguir una Europa más resiliente a los efectos del clima. La estrategia persigue tres objetivos principales: promover acciones de los Estados miembros, promover la adaptación en sectores vulnerables asegurando la mejora de la resiliencia de las infraestructuras y mejorar la toma de decisiones con información optimizada (European Commission, 2013).

En el ámbito de la investigación europea, existen numerosos proyectos de interés en la adaptación de infraestructuras al cambio climático y el aumento de la resiliencia. Entre ellos, cabe destacar el proyecto CLARITY, en el que han participado el CEDEX y Acciona, que ha permitido desarrollar herramientas para la identificación de

El Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) ha sido, desde 2006, el marco de referencia de los esfuerzos públicos para la construcción de respuestas adaptativas frente al cambio climático en España.

riesgos climáticos y el planteamiento de soluciones, con varios ejemplos de aplicación en distintos países de la Unión Europea, entre ellos España.

En España, El Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) ha sido, desde 2006, el marco de referencia de los esfuerzos públicos para la construcción de respuestas adaptativas frente al cambio climático. Actualmente, el PNACC 2021-2030 (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2021) constituye el instrumento de planificación básico para promover la acción coordinada frente a los efectos del cambio climático en nuestro país; las referencias específicas a las carreteras son escasas, si bien existe un apartado relacionado con movilidad y transporte que tiene como objetivos:

- Revisar los sistemas de observación, transmisión, almacenamiento, análisis, modelización y predicción de la operatividad de las infraestructuras, considerando el cambio climático.
- Incorporar criterios de adaptación al cambio climático a la planificación estratégica del sector transporte.
- Incorporar criterios de adaptación al cambio climático en la construcción de nuevas infraestructuras de transporte y ampliación de las existentes, así como en las fases de explotación y conservación.

- Revisar los protocolos de prevención, mantenimiento y vigilancia de las infraestructuras de transporte, considerando los riesgos derivados del cambio climático.
- Completar el desarrollo y la integración de los sistemas de alerta por riesgos meteorológicos en los medios de transporte.

En la Estrategia de Movilidad del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA) se incluyen también, entre las líneas de actuación del Eje 3 "Movilidad Segura", la adaptación de las infraestructuras al cambio climático.



Foto 2. Efecto de un deslizamiento de ladera debido a las fuertes lluvias (Fuente: Heraldo de Aragón)



Foto 3. Efectos de la borrasca Gloria en un puente en Barcelona (Fuente: EFE).

Las comunidades autónomas han desarrollado sus propios marcos estratégicos, planes y programas en materia de cambio climático. En cuanto a adaptación al mismo, el grado de desarrollo es reducido, aunque se pueden destacar el Programa Andaluz de Adaptación al Cambio Climático, el Programa de Adaptación al Cambio Climático en la Costa del Principado de Asturias o la Estrategia Regional de Adaptación al Cambio Climático de La Rioja, entre otros. Las referencias a las carreteras son, nuevamente, muy escasas.

Iniciativas de interés en el ámbito de las carreteras

Es importante destacar que se están realizando acciones de interés.

En el año 2012, el CEDEX y el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente llevaron a cabo un análisis preliminar sobre cuáles podrían ser las necesidades de adaptación al cambio climático de la red troncal de infraestructuras de transporte en España (CEDEX - Ministerio de Fomento, 2012). En relación a los impactos negativos, se concluyó que la mayor repercusión se produciría sobre los taludes y los firmes, por incremento de precipitaciones y aumento de las temperaturas máximas.

En 2018 se publicó el informe "Secciones de la red estatal de infraestructuras de transporte terrestre potencialmente más expuestas por razón de la variabilidad y cam-

bio climáticos" (CEDEX - Ministerio de Fomento, 2018), elaborado por el CEDEX en colaboración con el actual MITMA, ADIF y la Agencia Estatal de Meteorología, en el que se analizaba la vulnerabilidad de la red de carreteras y ferroviaria ante el cambio climático. La caracterización de la vulnerabilidad de las redes de carreteras se realizó a partir de una tipología preestablecida de impactos que incluía el deslizamiento de laderas y la caída de materiales y erosión en taludes como consecuencia de lluvias intensas, la erosión de taludes en terraplén junto a cauces como consecuencia de avenidas extraordinarias, la insuficiencia de capacidad de las obras de drenaje por lluvias

intensas, la erosión de estribos, socavación de pilas y obras de contención e impactos por arrastre de materiales en obras de fábrica por avenidas extraordinarias o la aparición de roderas en el pavimento como consecuencia de temperaturas elevadas, entre otros.

Entre las conclusiones del informe, cabe destacar que el 57% de la Red de Carreteras del Estado no se ve afectada por ningún evento de naturaleza climática, o lo está de forma muy reducida, mientras que el 43% restante sí es susceptible de verse afectada; el 6% de la red tiene una afectación importante por efectos climáticos.

Los resultados obtenidos en el informe del CEDEX publicado en 2018 ponen de manifiesto una incidencia de las condiciones climáticas mayor sobre determinados elementos de la infraestruc-



Foto 4. Daños provocados por un temporal en Cantabria (Fuente: El Diario Montañés).



Foto 5. Guía de buenas prácticas para la adaptación de las carreteras al clima (CAF – banco de desarrollo de América Latina y AEC).

tura, en particular sobre las obras de tierra y las obras de drenaje; por ello, se recomienda promover el análisis, durante la etapa de proyecto de la infraestructura, de las alternativas que cabe plantear para mejorar la resiliencia de estos elementos frente a la variabilidad y cambio climáticos.

La Asociación Española de la Carretera (AEC) desarrolla desde hace varios años un programa de actividades en el ámbito de la adaptación al cambio climático. Entre ellas, la más destacada es la realización, junto con CAF – banco de Desarrollo de América Latina, de la “Guía de buenas prácticas para la adaptación de las carreteras al clima” (CAF - banco de Desarrollo de América Latina, 2018), que plantea toda una batería de acciones estratégicas relacionadas con el liderazgo institucional, el marco legal y normativo, la garantía de financiación, la promoción de la innovación, etc.; asimismo, la guía define numerosas soluciones técnicas para su aplicación en las fases de diseño y operación, en los cuatro ámbitos definidos como prioritarios: geotecnia y taludes, drenaje, estructuras y pavimentos. Más recientemente, la AEC ha impartido, en el contexto del Programa Empleaverde, de la Fundación Biodiversidad, una acción formativa focalizada en la adaptación de las carreteras al clima.

Se trata, sin duda, de un ámbito de trabajo fundamental para la mejora de la movilidad y con una clara proyección más allá de nuestras fronteras, al que desde la AEC se va a dar una gran importancia en los próximos años.

Referencias bibliográficas

- I. CAF - banco de Desarrollo de América Latina. (2018). Guía de buenas prácticas para la adaptación de las carreteras al clima.
- II. CEDEX - Ministerio de Fomento. (2012). La consideración del cambio climático en la evaluación ambiental de planes y programas – Aplicación al caso de planes y programas de infraestructuras de transporte. Madrid.
- III. CEDEX - Ministerio de Fomento. (2018). Secciones de la red estatal de infraestructuras de transporte terrestre potencialmente más expuestas por razón de la variabilidad y cambio climáticos.
- IV. European Commission. (2013). Commission Staff Working Document. Adapting infrastructure to climate change. Bruselas (Bélgica).
- V. European Commission. (2013). The EU Strategy on adaptation to climate change. Bruselas (Bélgica).
- VI. Green Deal. (s.f.). https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es
- VII. Ministerio de Fomento. (2013). Necesidades de adaptación al cambio climático de la red troncal de infraestructuras de transporte en España. Madrid.
- VIII. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2021). Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2021-2030.
- IX. Proyecto Clarity. (s.f.). <https://clarity-h2020.eu/> ■

IRMD 2022. International Road Maintenance Day

Juan José POTTI
@jjpotti



Un año más vamos a celebrar el IRMD o *International Road Maintenance Day* 2022. En el año 2018 se conmemoró por primera vez el Día Internacional de la Conservación de Carreteras o *International Road Maintenance Day* (más conocido como por sus siglas en inglés: IRMD). Se trata de una iniciativa muy singular de la que tengo el orgullo de poder decir que soy fundador. Para los que no estéis familiarizados con la iniciativa, os animo a visitar: <https://roadmaintenance-day.org/es/inicio/>

El slogan de este año es #IRMD2022: "Conservar las carreteras es preservar el medio ambiente". El objetivo de esta iniciativa es celebrar el primer jueves de abril, este año el 7 de abril, en muchos países del mundo el IRMD 2022. Os pedimos a todos que usemos en nuestros mensajes a través de las redes sociales el hashtag #IRMD2022. Gracias a esta iniciativa, hemos conseguido ser *Trending Topic* varios años en varios países del mundo (España, México, Guatemala, etc.).

Desde hace 5 años y gracias al Día Internacional de la Conservación de Carreteras o *International Road Maintenance Day* (IRMD), se está generando un caldo de cultivo muy interesante e influyente para poder defender la necesidad de una conservación preventiva, con la consiguiente reducción de las emisiones generadas por los vehículos que circulan por nuestras carreteras. Ese año 2018 lanzamos un manifiesto bajo el título: "Conservar las carreteras es preservar el medio ambiente" que puedes descargar en https://www.asefma.es/wp-content/uploads/2018/04/manifiesto_IRMD2018.pdf

En el #IRMD2020 se batieron todas las marcas de impacto digital. La jornada se desarrolló en español e inglés en doble sesión de mañana y tarde y contó con la participación de políticos, académicos y representantes de entidades españolas, europeas y americanas vinculadas al sector viario; puede consultarse el programa 2020 en la web IRMD. El evento fue retransmitido también en la red de Twitter mediante la emisión de mensajes en directo con el hashtag #IRMD2020. El número total de tuits en sólo 24 horas fue de 7.772. Se generaron 140 respuestas y durante el evento se utilizaron 1.071 enlaces e imágenes. En total se acumularon 37.168.093 impactos. Los usuarios que mandaron algún tuit con el hashtag #IRMD2020 fueron 1.177. El alcance estimado o número de cuentas que recibieron algún tuit con el hashtag #IRMD2020 fue de 2.367.521. Estos

JUEVES, 7 de ABRIL de 2022

SESIÓN III: LA TRANSFORMACIÓN HACIA LAS CARRETERAS INTELIGENTES

09:00 IRMD, 2022 - DÍA INTERNACIONAL DE LA CONSERVACIÓN DE CARRETERAS

Coordina: Juan José Potti Cuervo - Fundador del IRMD

- Javier Herrero Lizano - Director General de Carreteras del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA).
- Enrique Catalina Carmona - Director General de Infraestructuras de la Junta de Andalucía.
- Javier Piedra Cabanes - Director de Carreteras de la Diputación Provincial de Valencia.
- Ángel Sampedro Rodríguez - Director del Área de Ingeniería y Arquitectura de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Alfonso X El Sabio.

Testimonios en video de:

- Francesc Xavier Flores Garcia - Secretario General de Infraestructuras del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA).
- Christine Leroy - Routes de France
- Carsten Karcher - Secretario General de European Asphalt Pavement Association (EAPA).

• I N T E R N A T I O N A L •
Road Maintenance Day

CADA m² DE PAVIMENTO BIEN CONSERVADO EVITA LA EMISIÓN DE HASTA 2.350 kg DE CO₂ PROCEDENTES DE LOS VEHÍCULOS QUE POR ÉL CIRCULAN [•EN 30 AÑOS]



datos son récord absoluto y suponen más del doble del impacto alcanzado en 2019.

Este año queremos poner de manifiesto los avances que se están produciendo en la conservación de las carreteras bajo la óptica de la innovación y la investigación. Queremos mostrar todos los avances que se están produciendo y que están enriqueciendo el sector de la pavimentación, dotándolo de una mayor sensibilidad ambiental. Bajo este punto de vista, también sería muy adecuado que nos comentaras tu opinión respecto al Manifiesto del IRMD o respecto de las famosas *Card IRMD* que están disponibles en la web, o tus reflexiones respecto a esta temática o al correcto modo de conservar las carreteras.

La idea es celebrar eventos similares en muchos países del mundo ese mismo día y usar el hashtag: #IRMD2022. ¡Os animo a ello!

Este año vamos a celebrar en España el IRMD 2022 en Granada, durante la celebración del V Congreso Andaluz de Carreteras (6-8

abril 2022). Por el momento, no figuran los participantes en la mesa redonda pero puedo anticipar que va a ser al máximo nivel y vamos a poner el foco en la importancia de la conservación preventiva de nuestras carreteras para hacer posible que las emisiones asociadas al transporte sean mucho más reducidas. Conviene tener en cuenta la magnitud de este punto. Teniendo en cuenta que las emisiones GEI en la Unión Europea son de unos 4.000 millones de toneladas de CO₂eq y que el transporte por carretera puede suponer alrededor de un 20% de dicha cifra, eso significa que unos 800 millones de toneladas de CO₂eq son generados por los vehículos que ruedan por nuestras carreteras. Se estima que el conjunto de emisiones GEI asociadas a la producción de mezclas asfálticas en la UE puede ser del orden de 10 millones de toneladas. Cada 1% de reducción en las emisiones de los vehículos genera una reducción equivalente a las emisiones de todas las mezclas asfálticas producidas en la Unión Europea. Por lo tanto, el mantener las capas de rodadura en un buen estado no se trata sólo de una cuestión de confort y seguridad vial, sino que proporciona una ayuda muy sustancial al reto global de la descarbonización. ■

Andalucía lidera el debate nacional sobre la próxima generación de carreteras

El 6 de abril arranca en Granada el V Congreso Andaluz de Carreteras. Un encuentro que retoma el debate viario desde la perspectiva de las administraciones autonómicas con la Junta de Andalucía a la cabeza.

Su contenido técnico se sustenta en tres ejes fundamentales: el Sello Verde como marca de la Junta para las carreteras sostenibles, las infraestructuras viarias inteligentes y la aplicación del Sistema Seguro a las redes de titularidad autonómica y provincial.

Con este marco conceptual y bajo el lema "Hacia la próxima generación de c@rreteras", las sesiones de trabajo recogen algunas de las iniciativas más vanguardistas e innovadoras en las que las administraciones públicas españolas trabajan actualmente en estrecha colaboración con el sector privado.

Por otro lado, a través de las cerca de 30 comunicaciones libres que se presentan dentro del programa técnico, otros tantos expertos van a dar a conocer sus productos, servicios y desarrollos aplicables a alguno de los tres grandes ejes temáticos del foro.

Granada, 24 años después

Organizado por la Asociación Española de la Carretera (AEC), y promovido por la Junta de Andalucía a través de su Consejería de Fomento, Infraestructuras y Ordenación del Territorio, el V Congreso Andaluz de Carreteras se celebra en el Palacio de Exposiciones y Congresos de Granada, ciudad a la que vuelve después de 24 años, cuando acogió su primera edición. Con esta nueva convocatoria, el encuentro afianza su liderazgo como foro científico y técnico de la industria viaria, no solo en el ámbito autonómico, sino también en el nacional.

El V Congreso Andaluz de Carreteras ha despertado el interés de un gran número de empresas y organizaciones que no han dudado en apostar por el gran evento viario

de 2022. Son más de 30 las que se han convertido en patrocinadoras del encuentro en alguna de sus tres modalidades: Diamante, Platino y Oro.

Al interés técnico del Congreso, se suma la posibilidad de participar en una exposición en la que mostrar lo mejor de su oferta. Cerca de 1.500 metros cuadrados de feria comercial dan cabida a una treintena de stands sobre los que se despliega todo tipo de propuestas innovadoras, servicios e iniciativas con que el sector viario mostrará su potencial tecnológico.

Finalmente, al éxito del encuentro ha contribuido enormemente el hecho de que se celebre en una de las regiones que está liderando la transformación de la red de carreteras española bajo los parámetros más innovadores, como es la Junta de Andalucía. ■

Mesas de debate

El programa del V Congreso Andaluz de Carreteras propone cinco sesiones de trabajo con una veintena de ponencias y siete mesas redondas.

En torno a dos de estas mesas de debate se sientan los consejeros de Infraestructuras de varias administraciones regionales y los directores generales de Carreteras de algunas de las autonomías españolas. En ellas, los máximos responsables políticos y técnicos de las redes viarias españolas tienen la ocasión de compartir soluciones testadas con éxito y buenas prácticas frente a problemas comunes.

- La Mesa Redonda de Consejeros de Infraestructuras de Comunidades Autónomas se celebra el 6 de abril. Presidida por Marifrán Carazo, Consejera de Fomento, Infraestructuras y Ordenación

del Territorio de Andalucía, tiene como objetivo poner en común, desde una perspectiva política, los problemas que afectan a las redes viarias prioritarias para la comunicación interior de las regiones y entre unas autonomías y otras. Problemas comunes con soluciones también similares y con la coordinación y el consenso como pautas de trabajo.

- Al día siguiente, el 7 de abril, tiene lugar la Mesa Redonda de Directores Generales de Carreteras de Comunidades Autónomas. En este caso, será Enrique Catalina, Director General de Infraestructuras de la Junta de Andalucía, el encargado de presidir el debate, cuyo objetivo es profundizar en el análisis técnico de los problemas que afectan a las redes viarias de competencia regional, con las conclusiones de la Mesa de Consejeros de Infraestructuras como referencia y punto de partida.

Septiembre, fin del plazo para participar en el Premio de la FAEC

La Fundación de la Asociación Española de la Carretera (FAEC) anima a los profesionales del sector a participar en la novena edición de su "Premio Internacional a la Innovación en Carreteras Juan Antonio Fernández del Campo - 2021-2022". El plazo para presentar los trabajos finaliza el próximo 21 de septiembre.

En la convocatoria anterior (2019-2020), y a pesar de la crisis sanitaria, la FAEC recibió un total de 23 originales. En esta nueva edición, con la actividad profesional casi a pleno rendimiento, se espera superar esta cifra y alcanzar las cotas de las sexta y séptima, a las que concurren más de treinta investigaciones.

Desde 2005, año en que se creó este Premio, se han presentado al certamen más

de 200 trabajos en los que han participado 546 profesionales de 23 países.

El galardón está dotado con 12.000 euros en metálico más la publicación en una edición especial impresa del trabajo premiado en un volumen de colección.

El Premio de la FAEC cuenta con el patrocinio de Banco Caminos, Cepsa y Repsol, la colaboración institucional de la Dirección General de Carreteras de la Consejería de Transportes, Movilidad e Infraestructuras de la Comunidad de Madrid, la colaboración patronal de Oficemen (Agrupación de Fabricantes de Cemento de España) y la colaboración empresarial de Dragados, Acciona Infraestructuras, Eiffage Infraestructuras, Euroconsult, FCC Construcción, Ferrovial Construcción, Lantania, OHL y Sacyr. ■

Equipamiento y fotocatalisis, ámbitos de actividad de los nuevos socios de la AEC

El diseño, fabricación e instalación de todo tipo de equipamiento para las infraestructuras de transporte forman la base del negocio de Metalesa, compañía que acaba de adherirse a la Asociación Española de la Carretera (AEC).

Metalesa, empresa familiar con sede en Carcaixent (Valencia), cuenta con una plantilla de más de 70 experimentados profesionales, desarrolla un catálogo de productos y servicios, que renueva anualmente gracias a una inversión sostenida en I+D+i.



Su actividad cubre toda la cadena de valor de sus productos y, en la actualidad, cuenta entre sus clientes con grandes constructoras europeas. Metalesa, a pesar de su carácter familiar, tiene una importante actividad internacional, con proyectos en más de 40 países de Europa, África, Oriente Medio y Latinoamérica.

La última entidad en unirse a la familia de la AEC ha sido la Asociación Ibérica de

Fotocatalisis (AIF). Constituida en 2011 como una entidad sin ánimo de lucro, integra en su seno a miembros tanto de España como de Portugal.



Sus principales objetivos son difundir en todos los ámbitos la tecnología fotocatalítica; establecer normas y test de evaluación de sus sistemas; definir recomendaciones de uso y otorgar certificaciones; identificar y reunir agentes, investigadores e industriales que trabajen en este campo y censar los diferentes segmentos productivos ligados a esta práctica.

Cabe recordar que la fotocatalisis es una reacción fotoquímica capaz de eliminar contaminantes habituales en la atmósfera -como son los NOx, SOx, compuestos orgánicos volátiles (COVs), etc- mediante un proceso de oxidación activado por energía solar. ■

NOMBRAMIENTOS

David Prat Soto

Es el nuevo Director General de Infraestructuras de Movilidad de la Generalitat de Cataluña. Sustituye en el cargo a Xavier Flores García, que ha sido nombrado Secretario General de Infraestructuras del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.

Prat es ingeniero de Caminos, Canales y Puertos y graduado en Ingeniería en Tecnologías Aeroespaciales. Hasta este nombramiento, ocupaba el cargo de Jefe del Servicio de Transportes del Departamento de Políticas Digitales y Territorio en el Camp de Tarragona. Desde esta área ha participado e impulsado proyectos de transporte público y de mejora de la red viaria, como la ampliación de la C-58 entre Terrassa y la AP-7.



Entre sus nuevos cometidos, deberá ordenar y planificar las infraestructuras y los equipamientos de movilidad competencia de la Generalitat, así como diseñar, proyectar, construir y realizar el seguimiento y supervisión de los mismos.

Mariló Jiménez Mateos

Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos con la Especialidad de Urbanismo y Ordenación del Territorio, se ha incorporado al Consejo de Redacción de la Revista *Carreteras* como vocal.



Funcionaria de la Escala de Técnicos Facultativos Superiores de Organismos Autónomos del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana desde el año 2001, Jiménez ha ocupado distintos puestos en la Administración. Entre 2008 y 2021 ha sido Jefa de Área Técnica de Estudios en la Unidad de Apoyo de la Dirección General de Carreteras del Ministerio.

Desde septiembre de 2021 ocupa el puesto de Jefa del Departamento de Estudios y Proyectos en la Subdirección General de Infraestructuras de Movilidad del Ayuntamiento de Madrid.



Socios patrocinadores

Administraciones



Asociaciones y Empresas



Socios

ADMINISTRACIÓN CENTRAL

- Dirección General de Carreteras (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana)
- Dirección General de Tráfico (Ministerio del Interior)

ASOCIACIONES

- Asociación de Empresas de Conservación y Explotación de Infraestructuras (ACEX)
- Asociación de Empresas Constructoras y Concesionarias de Infraestructuras (SEOPAN)
- Asociación de Fabricantes de Señales Metálicas de Tráfico (AFASEMETRA)
- Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas (ASEFMA)
- Asociación Española de Fabricantes de Sistemas Metálicos de Protección Vial (SIMEPROVI)
- Asociación Ibérica de la Fotocatálisis (AIF)
- Asociación Nacional de Fabricantes de Iluminación (ANFALUM)
- Asociación Nacional de Industriales de Pantallas y Dispositivos Antiruido (ANIPAR)

- Confederación Nacional de Autoescuelas (CNAE)
- Confederación Nacional de la Construcción (CNC)
- European Union Road Federation (ERF)
- FOROVIAL (Foro de Equipamiento para la Seguridad Vial)
- Instituto Vial Ibero-Americano (IVIA)
- Plataforma Tecnológica Española de la Carretera (PTC)

AUTOMOCIÓN

- CTAG-Centro Tecnológico de Automoción de Galicia

AYUNTAMIENTOS

- Barcelona
- Madrid

CENTROS DE INVESTIGACIÓN Y FORMACIÓN

- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX)
- E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid

- Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil
- Fundación Cartif
- IECA- Instituto Español del Cemento y sus aplicaciones

COLEGIOS PROFESIONALES

- Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
- Colegio de Ingenieros Técnicos de Obras Públicas

COMUNIDADES AUTONOMAS

- Ciudad Autónoma de Melilla
- Comunidad Autónoma de la Región de Murcia
- Comunidad de Madrid
- Generalitat de Catalunya
- Generalitat Valenciana
- Gobierno de Aragón
- Gobierno de Canarias
- Gobierno de Cantabria
- Gobierno de la Rioja
- Gobierno de Navarra
- Junta de Andalucía

- Junta de Castilla y León
- Junta de Comunidades de Castilla - La Mancha
- Junta de Extremadura
- Principado de Asturias
- Servei Catalá de Transit
- Xunta de Galicia

CONCESIONARIAS DE INFRAESTRUCTURAS

- Itinere Infraestructuras, S.A.

CONSTRUCTORAS

- Acciona Construcción, S.A.
- Aldesa Construcciones S.A.
- Azví, S.A.U.
- Becsa, S.A.U.
- Cyopsa-sisocia, S.A.
- Dragados, S.A.
- Eiffage Infraestructuras Gestión y Desarrollo, S.L.
- Elsamex Gestión de Infraestructuras, S.L.
- FCC Construcción, S.A.
- Ferrovial Construcción, S.A.
- Hermanos Santana Cazorla, S.L.
- Lantania, S.L.
- PABASA Euroasfalt, S.A.
- PROBISA
- Trabajos Bituminosos S.L.U. (TRABIT)

DIPUTACIONES, CABILDOS Y CONSELLS

- Álava
- Alicante
- Ávila
- Badajoz
- Barcelona
- Burgos
- Cádiz
- Castellón
- Ciudad Real
- Eivissa
- Girona
- Gipuzkoa
- Granada
- Huelva
- Huesca
- León
- Lleida
- Lugo
- Málaga
- Mallorca

- Orense
- Pontevedra
- Salamanca
- Sevilla
- Tarragona
- Tenerife
- Valencia
- Valladolid
- Vizcaya

ENTIDADES FINANCIERAS

- Banco Caminos

ESTABILIZACIÓN DE SUELOS Y RECICLADO DE PAVIMENTOS

- Firmes Ecologicos Soltec, S.A.

GESTIÓN DE INFRAESTRUCTURAS

- Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía.
- Madrid Calle 30, S.A.

INGENIERÍA Y CONSULTORÍA

- Artea Group
- BAC Engineering Consultancy Group, S.L.
- CPS Infraestructuras, Movilidad y Medio Ambiente, S.L.
- Drace Geocisa, S.A.
- Esteyco, S.A.
- Everis Ingeniería, S.L.U.
- Ingeniería Especializada Obra Civil e Industrial, S.A.U.
- Lauffer Ingenieros, S.L.
- Prointec, S.A.
- Técnicas y Proyectos, S.A. (TYPSA)

PETRÓLEOS

- Bitumex, S.A.
- CEPSA Comercial Petróleo, S.A.U.
- Repsol

PRODUCTOS QUÍMICOS - ADITIVOS

- Ecofirmes Ibérica, S.L.

SEGURIDAD VIAL

- Multiservicios Tritón, S.L.
- Pons Seguridad Vial, S.L.

SEÑALIZACIÓN

- 3M España S.L.
- API Movilidad
- Diez y Compañía, S.A
- GIVASA
- Grupo Villar, S.A
- Industrias Saludes, S. A. U.
- Lacroix Señalización, S.A.
- Postigo Conservación y Medioambiente, S.L.
- Proseñal, S.L.U.
- Reynober, S.A.
- Sovitec Ibérica, S.A.U.
- Tecnival, S.A.
- Tevaseñal, S.A.
- Transfer, Sociedad de Marcas Viales, S.L.
- Visever, S.L.

SISTEMAS DE CONTENCIÓN DE VEHÍCULOS

- Hierros y Aplanaciones, S.A. (HIASA)
- Metalesa Seguridad Vial, S.L.
- Rebloc

SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE Y REGULACIÓN DE TRÁFICO

- Alumbrados Viarios, S.A.
- Electronic Trafic, S.A.
- Fixalia Electronic Solutions, S.L.
- Indra Sistemas, S.A.
- Kapsch TrafficCom Transportation, S.A.
- Hikvision Iberia
- Lania Visuals, S.L.
- Revenga Smart Solution
- Sociedad Ibérica de Construcciones Eléctricas, S.A. (SICE)
- Sistem, S.A.

SOTFTWARE

- 1D3A Analógico y Digital, S.L.
- Advanced Services in Mobility (ASIMOB)
- Allplan España
- Autodesk, S.A.

TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y COMUNICACIONES

- T-Systems

VARIOS

- Comunicación y Diseño S.L.
- Cámara de Comercio de España
- Euskontrol, S.A.

Eiffage Infraestructuras, S.A.



EIFFAGE

Domicilio: Pol. Ind. Ctra de la Isla,
parcela E.L.-3 (Ctra. el Copero -
esq. calle Río Viejo)

C.P.: 41703 Dos Hermanas (Sevilla)

Teléfono: 954 610 400

Fax: 954 610 112

SUMINISTROS

MATERIALES

Aglomerados asfálticos en caliente
Fabricante de emulsiones
Áridos
Investigación en la fabricación de
mezclas bituminosas templadas

EJECUCIÓN DE TRABAJOS

CONSTRUCCIÓN Y CONSERVACIÓN

Asfaltado de carreteras, calles y
aparcamientos

Construcción y mantenimiento de
carreteras
Obras públicas
Pavimentos industriales
Fresado de pavimentos
Lechadas y Slurrys
Barreras de hormigón "in situ" a 1
y 2 caras
Ejecución de caz
Ejecución de bordillos de todo tipo
y medida

Ejecución de acequias y cunetas
Pavimentos de hormigón
Reciclado en frío "in situ"

CONTROL DE CALIDAD

En obra
En laboratorio
En planta
Ensayo de materiales
Medio Ambiente

I+D+i

INVESTIGACIÓN EN LA FABRICACIÓN DE NUEVOS PRODUCTOS

Mezclas bituminosas templadas
Mezclas con reciclado
Mezclas con polvo de neumático

Probisa Tecnología y Construcción S.A.



PROBISA

Domicilio: Gobelos, 25-27, 3ª plta.,
(La Florida)

C.P.: 28023 Madrid

Teléfono: +34 917 082 954

Fax: +34 913 729 022

Ámbito de actuación:

Nacional - Internacional

Facturación:

de 60,11 a 300,51 millones €

Web: www.probisa.com

SUMINISTROS

MAQUINARIA Y EQUIPOS

Plantas de fabricación de betunes
Plantas de fabricación de
emulsiones asfálticas
Evaluación de firmes

MATERIALES

Mezclas asfálticas en caliente

EJECUCIÓN DE TRABAJOS

CONSTRUCCIÓN Y CONSERVACIÓN

Conservación integral
Consolidación de terrenos
Drenajes
Estructuras
Fresado de pavimentos
Impermeabilización
Movimiento de tierras
Pavimentación con hormigón
hidráulico
Pavimentación con mezclas
asfálticas en caliente
Pavimentación con mezclas
asfálticas en frío

Mezclas asfálticas en frío
Mezclas asfálticas semi calientes y
templadas
Mezclas asfálticas con ligantes
modificados
Mezclas drenantes
Producción de áridos

MATERIAS PRIMAS Y ADITIVOS

Aditivos para asfaltos
Betunes asfálticos
Betunes asfálticos modificados
Emulsiones asfálticas
Emulsiones de betunes modificados
Materiales granulares

Productos químicos

SEGURIDAD VIAL Y GESTIÓN DE TRÁFICO

Pavimentos especiales

VARIOS

Software para carreteras

CONSULTORÍA E INGENIERÍA

Auscultación de firmes
Evaluación de firmes
Gestión de carreteras
Inventario de carreteras
Proyectos de acondicionamiento
Proyectos de estructuras de fábrica
Proyectos de rehabilitación
Proyectos de trazados

CONTROL DE CALIDAD

En obra
En laboratorio
En planta
Ensayo de materiales

MEDIO AMBIENTE

Paisajismo / Plantaciones vegetales
Protección y revegetación de taludes
Paneles antiruido

SEGURIDAD VIAL Y GESTIÓN DE TRÁFICO

Alumbrado público
Balizamiento
Barreras
Pantallas antideslumbrantes
Pavimentos especiales

OTROS

Validación de diversos tipos de
residuos



Azvi **IV**

Con el propósito de construir valor

www.azvi.es

Carretera A 465 "Heads of the Valleys". Gales, Reino Unido



Variante de Roquetas de Mar.
Almería, España



- Contamos con más de 55 años de experiencia.
- Con equipos multidisciplinares, creamos proyectos de calidad con detallados estudios de alternativas.
- Satisfacemos las necesidades de la sociedad de la forma más eficiente, proporcionando mejores soluciones, más sostenibles y resilientes.
- Con nuestros sistemas, procedimientos e innovación, trabajamos y alcanzamos el estado del arte, optimizando la inversión.
- Tenemos en cuenta los costes de construcción, operación y mantenimiento a lo largo de la vida útil de la inversión.



Viaducto de la Rodovia dos Tamoios.
Serra do Mar (São Paulo), Brasil

Enlace multidireccional I-10 /SR-303.
Phoenix (Arizona), EE. UU.



ingeniería de futuro para necesidades del presente