



accésit
BJÖRNULF B. BENATOV

AUSCULTACIÓN DE LA FISURACIÓN DESCENDENTE EN PAVIMENTOS ASFÁLTICOS MEDIANTE ULTRASONIDOS

Autores:

Miguel A. Franesqui

*Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Departamento de Ingeniería Civil, Escuela de Ingenierías
Industriales y Civiles (EIIC), Universidad de Las Palmas
de Gran Canaria (ULPGC), España.*

Juan Gallego

*Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras,
Departamento de Ingeniería Civil-Transportes,
Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos,
Universidad Politécnica de Madrid (UPM), España.*

Índice de contenidos

Resumen	83
Abstract	83
1 Introducción	87
1.1.- Problemática actual en la cuantificación del nivel de deterioro por TDC y la determinación de su profundidad	90
1.2.- Técnicas ultrasónicas en materiales asfálticos: principales limitaciones y necesidad de investigación adicional	93
1.3.- Propósito de la investigación	96
2 Metodología	96
2.1.- Técnica de autocalibración	97
2.2.- Materiales y preparación de probetas	99
2.3.- Equipos de ultrasonidos	100
2.4.- Mediciones con ultrasonidos en laboratorio	103
3 Deducción de modelos teóricos	105
4 Resultados experimentales en laboratorio y discusión	110
4.1.- Velocidades y tiempos de propagación de ultrasonidos	110
4.1.1.- <i>Influencia de la profundidad de la fisura y de la temperatura</i> ...	111
4.1.2.- <i>Efecto de la existencia de capas del firme despegadas</i>	114
4.1.3.- <i>Influencia del espesor de material asfáltico</i>	114
4.1.4.- <i>Efecto de la macrotextura superficial de la mezcla bituminosa</i> ..	115

4.2.- Ratios de transmisión	116
4.2.1.- Calibración del modelo teórico: dependencia de la profundidad de fisura y temperatura	116
4.2.2.- Efecto del agua u otro material rellenando el interior de la fisura	121
4.2.3.- Influencia de la excentricidad de la posición de los transductores	122
5 Estudios y trabajos experimentales <i>in situ</i>	123
5.1.- Evaluación <i>in situ</i> de los modelos calibrados	124
5.2.- Características observadas de la TDC e impacto sobre los firmes estudiados	125
6 Relevancia de resultados y principales aportaciones	130
7 Recomendaciones para la aplicación práctica de la técnica propuesta	131
8 Conclusiones	135
Agradecimientos	137
Referencias Bibliográficas	138

Resumen

La fisuración iniciada en la superficie de los pavimentos asfálticos (o fisuración descendente) constituye uno de los más frecuentes e importantes modos de deterioro que tienen lugar en estos firmes, como han demostrado los estudios teóricos y experimentales llevados a cabo en la última década.

Sin embargo, este mecanismo de fallo no ha sido considerado por los métodos tradicionales de diseño. Por ejemplo, el concepto de firmes de larga duración se fundamenta en un adecuado control del crecimiento de la profundidad de estos deterioros y la intervención en el momento más apropiado para conseguir mantenerlos confinados en la capa superficial más fácilmente accesible y reparable, de manera que pueda prolongarse la vida útil y reducirse los costes generalizados de su ciclo de vida. Por lo tanto, para la selección de la estrategia óptima de conservación de los firmes resulta esencial disponer de metodologías que posibiliten la identificación precisa *in situ* de la fisuración descendente, faciliten su seguimiento y que, además, permitan una determinación fiable y con alto rendimiento de su profundidad y extensión.

En esta investigación se presentan los resultados obtenidos mediante la investigación sistemática de laboratorio e *in situ* llevada a cabo para la obtención de datos sobre fisuración descendente en firmes asfálticos y para el estudio de procedimientos de evaluación de la profundidad de este tipo de fisuras

Abstract

Surface-initiated cracking of asphalt pavements constitutes one of the most frequent and important types of distress that occur in flexible bituminous pavements, as clearly has been demonstrated in the technical and experimental studies done over the past decade.

However, this failure mechanism has not been taken into consideration for traditional methods of flexible pavement design. For instance, the concept of long-lasting pavements is based on adequate monitoring of the depth and extent of these deteriorations and on intervention at the most appropriate moment so as to contain them in the surface layer in the form of easily-accessible and repairable partial-depth top-down cracks, thereby prolonging the durability and serviceability of the pavement and reducing the overall cost of its life cycle. Therefore, to select the optimal maintenance strategy for perpetual pavements, it becomes essential to have access to methodologies that enable precise on-site identification, monitoring and control of top-down propagated cracks and that also permit a reliable, high-performance determination of the extent and depth of cracking.

This research presents the results of systematic laboratory and in situ research carried out to obtain information about top-down cracking in asphalt pavements and to study methods of depth evaluation of this type of cracking using ultrasonic techniques. These results have demonstrated that the proposed non-destructive

empleando técnicas de ultrasonidos. Dichos resultados han permitido comprobar que la metodología no destructiva propuesta, de rápida ejecución, bajo coste y sencilla implementación (principalmente empleada hasta el momento en estructuras metálicas y de hormigón, debido a las dificultades que introduce la naturaleza viscoelástica de los materiales bituminosos) puede ser aplicada con suficiente fiabilidad y repetibilidad sobre firmes asfálticos. Las medidas resultan asimismo independientes del espesor total del firme. Además, permite resolver algunos de los inconvenientes frecuentes que presentan otros métodos de diagnóstico de las fisuras de pavimentos, tales como la extracción de testigos (sistema destructivo, de alto coste y prolongados tiempos de interrupción del tráfico) o algunas otras técnicas no destructivas como las basadas en medidas de deflexiones o el geo-radar, las cuales no resultan suficientemente precisas para la investigación de fisuras superficiales.

Para ello se han realizado varias campañas de ensayos sobre probetas de laboratorio en las que se han estudiado diferentes condiciones empíricas como, por ejemplo, distintos tipos de mezclas bituminosas en caliente (AC, SMA y PA), espesores de firme y adherencias entre capas, temperaturas, texturas superficiales, materiales de relleno y agua en el interior de las grietas, posición de los sensores y un amplio rango de posibles profundidades de fisura. Los métodos empleados se basan en la realización de varias medidas de velocidad o de tiempo de transmisión del pulso ultrasónico sobre una única cara o superficie accesible

methodology –cost-effective, fast and easy-to-implement– (mainly used to date for concrete and metal structures, due to the difficulties caused by the viscoelastic nature of bituminous materials) can be applied with sufficient reliability and repeatability to asphalt pavements. Measurements are also independent of the asphalt thickness. Furthermore, it resolves some of the common inconveniences presented by other methods used to evaluate pavement cracking, such as core extraction (a destructive and expensive procedure that requires prolonged traffic interruptions) and other non-destructive techniques, such as those based on deflection measurements or ground-penetrating radar, which are not sufficiently precise to measure surface cracks.

To obtain these results, extensive tests were performed on laboratory specimens. Different parametric conditions were studied, such as various types of hot bituminous mixtures (AC, SMA and PA), differing thicknesses of asphalt and adhesions between layers, varied temperatures, surface textures, filling materials and water within the crack, different sensor positions, as well as an ample range of possible crack depths. The methods employed in the study are based on a series of measurements of ultrasonic pulse velocities or transmission times over a single accessible side or surface of the material that make it possible to obtain a signal transmission coefficient (relative or auto-calibrated readings). Measurements were taken at low frequencies by two short-pulse ultrasonic devices: one equipped with dry point contact transducers (DPC) and the other with flat contact transducers that require a specially-selected coupling material

del material, de manera que resulte posible obtener un coeficiente de transmisión de la señal (mediciones relativas o autocompensadas). Las mediciones se han realizado a bajas frecuencias de excitación mediante dos equipos de ultrasonidos diferentes dotados, en un caso, de transductores de contacto puntual seco (DPC) y siendo en el otro instrumento de contacto plano a través de un material especialmente seleccionado para el acoplamiento (CPC). Ello ha permitido superar algunos de los tradicionales inconvenientes que presenta el uso de los transductores convencionales y no precisar preparación previa de las superficies. La técnica de autocalibración empleada elimina los errores sistemáticos y la necesidad de una calibración local previa, demostrando el potencial de esta tecnología.

Los resultados experimentales han sido comparados con modelos teóricos simplificados que simulan la propagación de las ondas ultrasónicas en estos materiales bituminosos fisurados, los cuales han sido deducidos previamente mediante un planteamiento analítico y han permitido la correcta interpretación de dichos datos empíricos. Posteriormente, estos modelos se han calibrado mediante los resultados de laboratorio, proporcionándose sus expresiones matemáticas generalizadas y gráficas para su uso rutinario en las aplicaciones prácticas.

Mediante los ensayos con ultrasonidos efectuados en campañas llevadas a cabo in situ, acompañados de la extracción de testigos del firme, se han podido evaluar

(CPC). In this way, some of the traditional inconveniences presented by the use of conventional transducers were overcome and a prior preparation of the surfaces was not required. The auto-compensating technique eliminated systematic errors and the need for previous local calibration, demonstrating the potential for this technology.

The experimental results have been compared with simplified theoretical models that simulate ultrasonic wave propagation in cracked bituminous materials, which had been previously deduced using an analytical approach and have permitted the correct interpretation of the aforementioned empirical results. These models were subsequently calibrated using the laboratory results, providing generalized mathematical expressions and graphics for routine use in practical applications.

Through a series of ultrasound field testing campaigns, accompanied by asphalt core extraction, it was possible to evaluate the proposed models, with differences between predicted crack depths and those measured in situ lower than 13% (with a confidence level of 95%). Thereby, the criteria and the necessary recommendations for their implementation on in-service asphalt pavements have been established. The experience obtained through this study makes it possible to integrate this methodology into the evaluation techniques for pavement management systems.

los modelos propuestos. El máximo error relativo promedio en la estimación de la profundidad de las fisuras al aplicar dichos modelos no ha superado el 13%, con un nivel de confianza del 95%, en el conjunto de todos los ensayos realizados. La comprobación in situ de los modelos ha permitido establecer los criterios y las necesarias recomendaciones para su utilización sobre firmes en servicio. La experiencia obtenida posibilita la integración de esta metodología entre las técnicas de auscultación para la gestión de su conservación.

1. Introducción

Los firmes, como cualquier otra construcción, desde su puesta en servicio y a lo largo de toda su vida útil se ven sometidos a muy diversos procesos de deterioro, entre los cuales la fisuración constituye uno de los principales modos de fallo. Los métodos tradicionales de dimensionamiento de firmes asfálticos, e incluso muchas de las soluciones de rehabilitación basadas en el recrecimiento con nuevas capas bituminosas, han aceptado que las fisuras se iniciaban en el fondo de las capas asfálticas debido a fenómenos de fatiga por efecto de las sollicitaciones del tráfico, o bien eran reflejadas desde otras capas inferiores más rígidas y se propagaban hacia la superficie ("*bottom-up cracking*", BUC).

Sin embargo, investigaciones teóricas y experimentales en la última década han demostrado que el mecanismo de deterioro por **fisuración originada en la superficie** del pavimento y con propagación descendente ("*top-down cracking*", TDC) constituye **uno de los más frecuentes e importantes modos de degradación** que tienen lugar en los firmes bituminosos y que, con frecuencia, las fisuras de fatiga también pueden iniciarse en la superficie y propagarse hacia abajo (Myers et al., 1998; Baladi et al., 2003; AAT, 2004; Croll, 2009), como sucede con las fisuras de fatiga térmica, e incluso también con algunas grietas reflejadas (Nesnas & Nunn, 2006). También se ha demostrado que presenta un **gran impacto y afección** sobre estos firmes: las fisuras TDC se identificaron en 22 países europeos como la tercera causa de deterioro

observada, después de las roderas y la pérdida de resistencia al deslizamiento, y por encima de los otros tipos de fisuración (Acción COST 333, European Commission, 1999). De la misma manera, varios estudios realizados por los Departamentos de Transportes de algunos estados norteamericanos como Colorado (Harmelink & Aschenbrener, 2003) y Michigan (Baladi et al., 2003) (Fig. 1) han concluido que la fisuración descendente se daba con una frecuencia entre tres y cuatro veces superior que la fisuración reflejada desde capas inferiores. Por otra parte, también según la investigación realizada en la Acción COST 324 (European Commission, 1997) con la participación de 15 estados europeos, el segundo indicador de comportamiento de mayor importancia relativa como causa para la conservación de los firmes en la red principal de carreteras resultó ser el agrietamiento de la capa superficial.

En sus etapas iniciales las fisuras originadas en superficie del pavimento (principalmente grietas longitudinales en los bordes de las bandas de rodadura o entre éstas, como muestran las Figuras 1 y 2a) suelen afectar exclusivamente a las propiedades superficiales, pero al ir extendiéndose, interconectándose y aumentando su profundidad (apareciendo morfologías transversales [Fig. 2b], oblicuas, en forma de estrella, en bloques o combinadas), facilitan la penetración del agua hacia el interior debilitando la estructura, la adherencia entre capas y generando la desintegración del firme e incluso de su cimiento (daño estructural). La experiencia ha puesto de manifiesto que la TDC puede ser observada en muy diferentes condiciones climáticas,

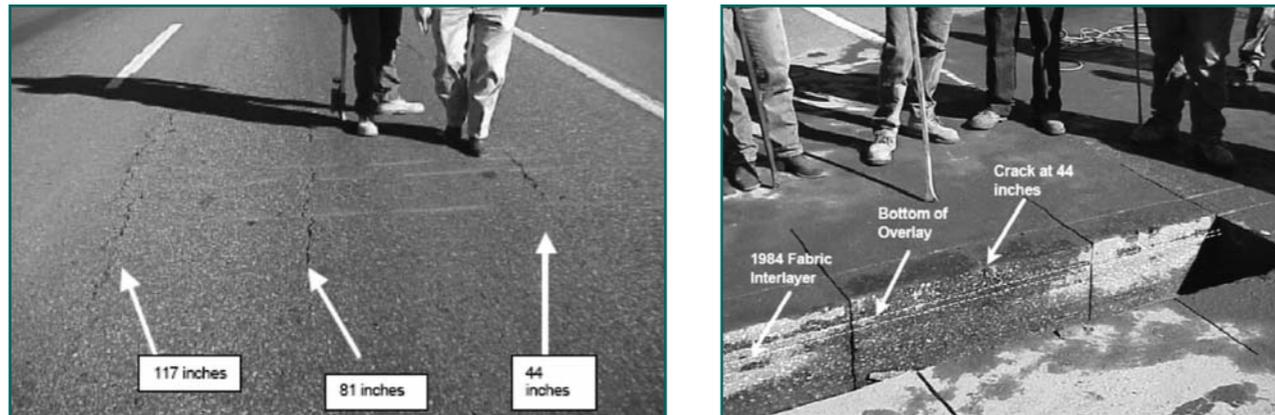


Figura 1.- Ejemplo de fisuras longitudinales de tipo TDC en la I-25 y calicata para su inspección (Michigan, USA, 2000).
[Fuente: Baladi et al., 2003].



Figura 2.- Ejemplos de fisuras de tipo TDC en la GC-3 y testigo extraído (Las Palmas de Gran Canaria, 2010).

incluyendo climas templados (ARA & ERES Consultants Division, 2004), bajo intensa acción de la radiación ultravioleta y en estructuras de firme de importante espesor (por encima de 16-18 cm de mezclas asfálticas) y semirrígidas (o incluso cuando el módulo de las capas granulares y de la explanada resulta más elevado). La edad o tiempo en servicio del firme a partir del cual han comenzado a ser observadas oscilan entre uno y diez años desde la construcción del firme.

Desde finales de los años 90 el reconocimiento del impacto de la TDC en el ciclo de vida de los firmes asfálticos y su complejidad ha dado lugar a numerosos análisis sobre sus patrones geométricos, factores de influencia y mecanismos que gobiernan la iniciación y propagación (además de los trabajos ya mencionados, puede citarse a Matsuno & Nishizawa, 1984; Uhlmeier et al., 2000; Freitas et al., 2002; Witczak & El-Basyouny, 2004; University of Florida, 2008). Constituye un complejo modo de deterioro superficial cuyos mecanismos aún no han sido completamente resueltos, si bien la combinación de tensiones tangenciales y de tracción por la interacción neumático-pavimento, las tensiones térmicas diferenciales y gradientes verticales de temperatura, la pérdida de adhesión entre capas, los gradientes de rigidez, los defectos constructivos y de materiales, así como el envejecimiento prematuro del betún, se han reconocido como factores influyentes. Sin embargo, todavía en la actualidad se precisa un mayor esfuerzo orientado hacia campañas de **obtención de datos empíricos** sobre firmes en servicio que identifiquen y evalúen la fisuración iniciada

en la superficie de los firmes, especialmente **en las carreteras españolas**, ya que hasta el momento de esta investigación no existían datos publicados en nuestro país sobre este modo de fallo.

La fisuración descendente adquiere especial relevancia en el diseño, construcción y conservación de los denominados firmes asfálticos de larga duración (también denominados "pavimentos perpetuos", de bajo mantenimiento o de vida extendida). Esta concepción de los firmes exige, además de un adecuado diseño y construcción, mantener confinados los deterioros y, en consecuencia, las tareas de conservación sobre la capa superficial más fácilmente accesible y reparable, de modo que no se precisen importantes operaciones de rehabilitación estructural o reconstrucción porque los deterioros no deben afectar a las capas inferiores, necesitando solamente renovaciones periódicas de la rodadura (Newcomb et al., 2001; Timm & Newcomb, 2006). En este sentido, el correcto control y monitorización mediante inspecciones periódicas del progreso de los deterioros como la TDC adquiere una importancia trascendental para incrementar su ciclo de vida, garantizar su durabilidad y reducir los costes de rehabilitación futuros. Para ello, y en el contexto de los Sistemas de Gestión de Firmes (PMS), resultaría necesario disponer de **técnicas y procedimientos de auscultación** que permitiesen un mejor conocimiento de las condiciones y niveles de deterioro por TDC, determinando **su profundidad y extensión** para optimizar las decisiones de dónde y cuándo intervenir, así como la profundidad del tratamiento. Resultaría esen-

cial establecer metodologías que permitiesen la **identificación precisa in situ de la TDC**, discriminándola por ejemplo de la fisuración de tipo ascendente, así como el seguimiento de su progreso mediante controles periódicos.

1.1. Problemática actual en la cuantificación del nivel de deterioro por TDC y la determinación de su profundidad

Un modelo de deterioro por TDC en firmes asfálticos ha sido incorporado en la metodología establecida en la *Mechanistic-Empirical (M-E) Design Guide for new and rehabilitated pavement structures*, MEPDG (ARA & ERES Consultants Division, 2004) y en su manual de aplicación (ARA, 2007), si bien solamente para el caso de fisuras longitudinales provocadas por la acción acumulada del tráfico. Pero incluso en estos actuales y avanzados métodos de diseño M-E de firmes, existen importantes limitaciones en cuanto a la selección de la magnitud que se utiliza como representativa para **medir y cuantificar el nivel de deterioro por TDC** así como los umbrales críticos de fallo a partir de los cuales se considera agotado el pavimento. Por ejemplo, en la anterior metodología y para los deterioros por fisuración, se ha adoptado para dicha magnitud o bien el área de superficie fisurada o bien la longitud de las fisuras (caso de deterioro por TDC), lo cual viene siendo tradicionalmente aceptado desde los primeros métodos de diseño AASHTO, debido a que otras posibles variables como la **profundidad de las grietas**

resultan en la práctica difíciles de medir in situ de forma rápida, sencilla y fiable.

Sin embargo, las observaciones empíricas en ensayos de laboratorio y sobre firmes en servicio han revelado que las fisuras no aparecen de forma significativa en los primeros años de vida de la mezcla bituminosa (fase de nucleación o micro-fisuración) sino que suelen hacerlo repentinamente y con propagación más rápida a partir de cierta edad o umbral de daño acumulado (fase de macro-fisuración), esta última de carácter irreversible (Zhang et al., 2001a, 2001b; Birgisson et al., 2002; Wang et al., 2005). En el caso de firmes con un nivel de fisuración aún bajo, cuando se adopta la longitud de las fisuras como magnitud representativa del deterioro, el patrón anterior no puede entonces ser observado de forma clara y, en ocasiones, presenta variaciones anómalas. Dichas anomalías pueden deberse a que el mecanismo de fisuración se desarrolla en forma de escalones (Jacobs et al., 1996; Kim et al., 1997; Roque et al., 1999), como establece el modelo *"HMA Fracture Mechanics"* (Zhang et al., 2001a, 2001b; Birgisson et al., 2002; Sangpetngam et al., 2003), o a errores de medida o clasificación debido a las dificultades inherentes a su correcta identificación en estas fases iniciales. Las mencionadas inconsistencias en los datos empíricos de fisuración longitudinal ya han sido puestas de manifiesto anteriormente por otras investigaciones (Fugro-BRE, 2001; Wang et al., 2005). Por lo tanto, por todas estas razones sería preferible la utilización de la **profundidad de las fisuras** como magnitud **para cuantificar el nivel de**

deterioro por TDC, ya que esta última influye de forma decisiva en su durabilidad y es la que debería tomarse como criterio a la hora de adoptar decisiones sobre la rehabilitación del firme.

Pero la principal dificultad radica en que hasta el momento se dispone de **pocas herramientas eficaces** para la identificación inequívoca de las fisuras iniciadas en superficie del resto de deterioros que incluyen fisuración. Los métodos típicamente utilizados para la evaluación de la fisuración suelen ser la inspección visual y la extracción de testigos, pero ambos presentan inconvenientes. La simple inspección visual no permite determinar si una fisura observada sobre la superficie de un firme ha tenido origen en la propia superficie o procede de las capas inferiores. Por supuesto tampoco permite estimar su profundidad; ni siquiera identificar su extensión, es decir si la fisuración es parcial o completa (afecta a todo el espesor asfáltico). La extracción de testigos del firme (Figura 2c) constituye en la actualidad el procedimiento habitual para determinar la profundidad de afección de las fisuras. Sin embargo, sus principales inconvenientes son su carácter destructivo y las prolongadas interrupciones de tráfico necesarias, lo cual se traduce en importantes tiempos y costes de ejecución, de manera que sólo puede obtenerse un reducido muestreo en cada investigación. Por otra parte, de acuerdo con nuestra propia experiencia en las campañas efectuadas, con avanzados estados de fisuración el testigo extraído puede resultar completamente fracturado y, por ello, resultar muy difícil (y en ocasiones imposible) la determi-

nación precisa de la profundidad de la grieta, incluso también sobre la pared del orificio. Además, la información que proporcionan tiene sólo carácter puntual, restringida a los puntos en los que se ha efectuado la testificación.

En consecuencia, se precisa más investigación sobre otras técnicas que resulten sencillas, económicas y rápidas de operar para la identificación, el seguimiento y control in situ de la propagación de las fisuras descendentes a lo largo de la vida útil del firme. Además, han de permitir la determinación con suficiente fiabilidad y alto rendimiento de la profundidad y extensión de este daño sobre los firmes en servicio sin necesidad de largas interrupciones del tráfico ni de su ulterior reparación. En este sentido, los métodos de auscultación de mayor rendimiento suelen ser los ensayos no destructivos (*"Non-Destructive Testing"*, NDT). Pero algunos de estos **sistemas empleados habitualmente** en la ingeniería de pavimentos para su evaluación no destructiva (NDE) o no resultan aplicables para este propósito o **no resuelven completamente el problema**. De hecho, la profundidad de la fisuración es una de las propiedades de la superficie de la carretera más difíciles de medir y evaluar usando equipos NDT.

Por ejemplo, las técnicas automáticas Vídeo-Láser, incluso las más modernas que incorporan cámaras de vídeo 3D (de alta velocidad y definición con procesamiento digital de las imágenes) y proyectores láser lineales emparejados como los equipos LCMS (*"Laser Crack Measurement System"*), no permiten la medición

de la profundidad real de las fisuras. La profundidad que puede percibir el láser es aproximadamente la visible, pero no la verdadera profundidad estructural de la grieta. Es decir, con estos equipos se puede acometer una inspección de las características superficiales de la fisuración pero no distinguir a qué capas está afectando cada fisura.

Las metodologías y dispositivos de ensayo basados en la medida de deflexiones como los deflectómetros de impacto (FWD) y dispositivos similares, aunque posibilitan conocer el estado estructural de un firme relacionado con su nivel de deterioro, no permiten una evaluación de la geometría de determinados defectos como el tamaño de las fisuras, debido a que las deflexiones resultan excesivamente sensibles a otros muchos parámetros (rigideces y espesores de las capas, propiedades de la subestructura del firme, etc.) que tienen mayor influencia sobre los resultados que la presencia de tales defectos superficiales (Tertre et al., 2010).

Otras técnicas NDT que emplean pulsos electromagnéticos cortos de radiofrecuencia como el geo-radar ("Ground Penetrating Radar", GPR) presentan el inconveniente de una muy compleja interpretación de resultados en la detección de defectos con características y geometrías muy variables, requiriendo para ello una alta especialización y experiencia con esta metodología. El GPR se ha empleado para identificar disminuciones de la rigidez de las capas debido a la existencia de fisuras (Hugo et al., 2008), así como para la investigación de grietas longitudinales y transver-

sales en procesos de degradación extensiva en pavimentos asfálticos mediante un análisis cuantitativo comparado de la atenuación de la señal con la profundidad. Y si bien, según algunos investigadores ofrece la posibilidad de estudiar algunas de las posibles causas de estos deterioros (Colagrande et al., 2007), la actual tecnología no proporciona suficiente precisión en la estimación de la profundidad de la TDC. Más recientemente, la técnica GPR con medidas a alta velocidad sobre el firme ha sido objeto de investigación en el marco del *Second Strategic Highway Research Program (SHRP 2. Renewal Project R06C)* (Wimsatt et al., 2009).

Los ensayos de evaluación no destructiva que emplean ondas elásticas (sísmicas) transitorias también han sido aplicados sobre materiales de pavimentación. Algunas de estas técnicas son, por ejemplo: UPV ("Ultrasonic Pulse Velocity"), UBW ("Ultrasonic Body Waves"), USW ("Ultrasonic Surface Waves"), AU ("Acousto-Ultrasonics"), IE ("Impact-Echo"), UPE ("Ultrasonic Pulse Echo"), SASW ("Spectral Analysis of Surface Waves"), FTC ("Fourier Transmission Coefficient"), IR ("Impulse-Response") y P-A ("Phased-Array"), entre las más conocidas. Para la auscultación sistemática de los firmes se han desarrollado equipos capaces de realizar NDT mediante ondas sónicas y ultrasónicas con un elevado rendimiento al ir incorporados en el equipamiento de un remolque, como por ejemplo el "Seismic Pavement Analyzer" (SPA), desarrollado bajo el *Strategic Highway Research Program (SHRP)* en la Universidad de Texas at El Paso (Nazarian et al., 1993), del cual existe incluso una versión portátil más simplificada ("Portable Seis-

mic Pavement Analyzer", PSPA). Sin embargo, tampoco este tipo de equipos han sido concebidos para la auscultación de deterioros de pequeñas dimensiones, por lo que no resultan aplicables en la evaluación de la profundidad de las fisuras descendentes que afecten exclusivamente a las capas superiores del firme, pues sólo podrían ser detectadas cuando evolucionasen hacia fisuras completas afectando a todo el espesor de éste, pero no en sus primeras fases iniciales.

1.2. Técnicas ultrasónicas en materiales asfálticos: principales limitaciones y necesidad de investigación adicional

La mayoría de las técnicas para la determinación de la profundidad de una grieta basadas en ondas elásticas, empleadas hasta la fecha en otros materiales como metales, plásticos y hormigones, se fundamentan en el análisis de las amplitudes del pulso, las velocidades de propagación o el contenido en frecuencias de la señal tras la dispersión de las ondas. Pero, la aplicación de muchas de las técnicas microsísmicas sobre los materiales de composición multifase con microestructura interna heterogénea presenta diversos inconvenientes por los problemas de **múltiples dispersiones de las ondas** y la limitación de la profundidad de penetración en el material investigado, debido a la **elevada atenuación**. Esto obliga a una adecuada elección de la metodología de ensayo y del tipo de sensores, así como a la necesidad de limitar las frecuencias de operación para reducir los anteriores inconvenientes que conducen a errores en las medidas, lo que puede

entonces provocar que las ondas no sean sensibles a defectos de muy pequeñas dimensiones.

En el caso particular de las mezclas bituminosas existe la dificultad añadida de su naturaleza viscoelástica y su complejo comportamiento mecánico dependiente de la temperatura, de la frecuencia de excitación e incluso del grado de envejecimiento del ligante, influyendo en sus propiedades acústicas. Por otro lado, la velocidad de fase, atenuación y dispersión que experimentan las ondas sísmicas en estos **materiales viscoelásticos** resulta **altamente dependiente** de la frecuencia (Hauwaert et al., 1998; In et al., 2009), como se muestra en la Figura 3. Además, dichas propiedades

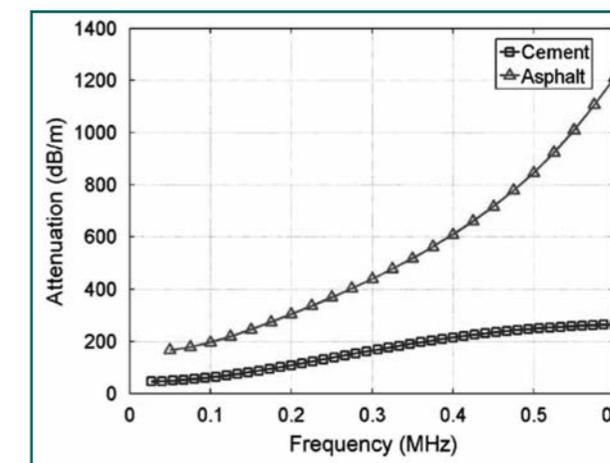


Figura 3.- Atenuación de las ondas ultrasónicas en una mezcla asfáltica y su dependencia con la frecuencia ($T=22\text{ }^{\circ}\text{C}$). Comparación con la atenuación en una pasta de cemento Portland. [Fuente: In et al., 2009].

son igualmente dependientes del tipo de transductores y sistema de acoplamiento empleados.

Además, las mediciones pueden verse afectadas por el contenido de humedad en los poros y por la naturaleza, granulometría y tamaño máximo de los áridos. Existen también dificultades para su aplicación relacionadas con los **problemas de acoplamiento** entre los transductores y la superficie rugosa, muy irregular y con múltiples poros de los pavimentos (que se traduce en mediciones sometidas a mayores errores y dispersión de resultados), la anisotropía en estratos horizontales y la compleja interpretación de los resultados debido a los altos niveles de atenuación y ruido en la señal. La **elección del tipo de sensores, la frecuencia de pulso** más adecuada en cada caso, e incluso la selección de la ubicación sobre la superficie del material donde han de realizarse las mediciones es aún un **problema no completamente resuelto** (Hauwaert et al., 1998).

Por ello, la aplicación de los ultrasonidos a los materiales asfálticos compuestos como las mezclas bituminosas ha sido tradicionalmente bastante limitada (Moore et al., 1978; Smith & Lytton, 1985; Rose et al., 1987; Rose & Pilarski, 1988) y aún continua siéndolo en la actualidad, habiéndose centrado principalmente en la caracterización de sus propiedades mecánicas, en la estimación de la vida útil a fatiga y en la detección de ciertos defectos como huecos y segregaciones. Sin embargo, ha sido escasa la investigación aplicada a la evaluación de los defectos de tipo fisuración en los

pavimentos mediante técnicas ultrasónicas (Khazanovich et al., 2005), si bien el estudio de la dispersión elastodinámica de ondas elásticas inducida por fisuras abiertas en la superficie de materiales metálicos y hormigones convencionales haya sido utilizado para el análisis de estos defectos superficiales desde hace al menos tres décadas (Achenbach et al., 1980; Mendelsohn et al., 1980; Wu et al., 1995; Kee & Zhu, 2010). Las características de fase del frente de ondas difractadas por la fisura ofrecen importante información sobre la geometría de la grieta, pero a causa de la interacción entre las ondas incidentes y multirreflejadas por sus contornos que inducen fenómenos de dispersión en campo cercano, la determinación no destructiva de la profundidad de una fisura mediante ondas elásticas no resulta en absoluto un problema trivial (Wu, 1999).

Los ensayos con técnicas ultrasónicas emplean ondas con frecuencias por encima de 20 kHz generadas y recogidas por sendos transductores piezoeléctricos. La señal recibida proporciona información sobre las propiedades del medio de transmisión y posibles defectos en éste. Los dispositivos generalmente son económicos y portátiles, las muestras no requieren preparación previa y las ondas producidas no son peligrosas. Los transductores más tradicionales y conocidos presentan una superficie de contacto plana y requieren el empleo de un medio auxiliar de acoplamiento (generalmente sustancias grasas o ceras), de manera que se reduzca la diferencia de impedancias acústicas entre el aire interpuesto y ambas superficies, con el fin de que pueda aumentarse el coeficiente de

transmisión. Estos transductores de tipo *"Couplant Plate Contact"* (CPC) o también denominados FPC (*"Flat Plate Contact"*) presentan varios inconvenientes: la aplicación de dicha sustancia ralentiza el procedimiento de medición y perjudica la limpieza del proceso; su aplicabilidad resulta limitada sobre superficies muy rugosas, porosas o de fuerte curvatura, reduciéndose la repetibilidad de las mediciones sobre éstas; existe la posibilidad de errores en las medidas debido al tamaño del área de contacto en relación con la distancia entre transductores (Khazanovich et al., 2005), así como por la gran abertura del haz sónico de estos sensores (especialmente cuando se emplean bajas frecuencias).

En consecuencia, existe una **importante necesidad** de mayores esfuerzos en la **investigación de técnicas** para la evaluación no destructiva de la fisuración **mediante ultrasonidos**, que contribuyan a superar las actuales

limitaciones y puedan utilizarse en las aplicaciones prácticas sobre firmes en servicio. En este sentido los transductores de contacto seco (*"Dry Point Contact"*, DPC), al ofrecer un contacto de tipo puntual podrían evitar algunos de los problemas de acoplamiento mencionados y proporcionar una alternativa a los transductores CPC tradicionales especialmente sobre las superficies muy irregulares y porosas de las mezclas asfálticas (Fransesqui, 2011; Fransesqui et al., 2011). Así podría mejorarse la repetibilidad y reducirse los errores por deficiencias de acoplamiento, siendo además suficientemente robustos (Fig. 4). Sin embargo, los transductores DPC también pueden presentar ciertos inconvenientes en las aplicaciones prácticas, ya que las medidas pueden verse afectadas por la inclinación del transductor y la presión de contacto que se ejerza sobre éste (Nesvijski, 2003), por lo que se precisa profundizar en la investigación de éstos y otros factores para su empleo sobre los materiales bituminosos.



Figura 4.- a) Transductor con extensión de perfil exponencial para mediciones de contacto seco (DPC) [Fuente: Nesvijski, 2003]; b) Detalle del apoyo de un transductor DPC sobre una probeta de mezcla asfáltica.

1.3. Propósito de la investigación

De acuerdo con las necesidades planteadas en los apartados anteriores, el objeto de esta investigación teórica y experimental ha sido el desarrollo de técnicas y procedimientos no destructivos que resulten sencillos de implementar y económicos, pero a su vez de alto rendimiento, para la **identificación in situ del deterioro por fisuración descendente** y que además permitan auscultar con suficiente precisión su **profundidad y extensión**, posibilitando así el control de su evolución.

Además, resulta necesaria la **deducción de modelos teóricos** iniciales que permitan simular los fenómenos de propagación de las ondas en estos materiales asfálticos y la correcta interpretación de los resultados, ya que en ninguno de los anteriores trabajos publicados sobre la utilización de técnicas ultrasónicas de autocalibración en mezclas bituminosas, que permitan compensar los errores de acoplamiento, se ha planteado modelo teórico alguno, ni analítico ni numérico; ni siquiera de tipo aproximado (Khazanovich et al., 2005). Por esta razón, la deducción de modelos matemáticos de propagación de los ultrasonidos en presencia de una fisura sobre un pavimento ha sido también uno de los principales objetivos del presente trabajo.

Adicionalmente, y puesto que para el desarrollo de la técnica se precisa de la obtención previa de datos empíricos sobre la **TDC en pavimentos en servicio**, el análisis de su afección e impacto sobre nuestras carreteras ha sido igualmente objeto de investigación, en

las cuales hasta la fecha no se había abordado su estudio (Fransesqui, 2011). De hecho, incluso en la actualidad e internacionalmente, no resultan tan numerosos los datos y estudios disponibles sobre este tipo de deterioro de los firmes si se compara por ejemplo con otros mecanismos de fallo como la fisuración por fatiga, por retracción térmica o reflejada. Por ello, en este estudio se ha analizado por primera vez en España su impacto sobre los firmes bituminosos de climas templados (exentos de problemas de fisuración por retracción a bajas temperaturas y limitados gradientes térmicos), con reducida pluviometría (menor incidencia del efecto de la acción del agua sobre los firmes) y sometidos a una intensa acción de la radiación ultravioleta, tratando de identificar sus posibles causas y evaluando su incidencia en función del tiempo en servicio transcurrido.

2. Metodología

Para la consecución de los objetivos postulados, el desarrollo metodológico de la investigación ha comenzado con la deducción analítica de modelos teóricos simplificados (**modelos "mecánicos"**) que permitiesen la simulación de los fenómenos de propagación de las ondas en los materiales objeto de estudio y la interpretación de los resultados bajo determinadas condiciones experimentales.

Estos modelos iniciales han sido posteriormente calibrados con los resultados de los ensayos de dos

campañas completas con ultrasonidos sobre probetas de laboratorio (**modelos "mecánico-empíricos"**), que han permitido validar la aplicación de las técnicas e instrumentos utilizados, así como el estudio sistemático y controlado del efecto de diferentes variables y condiciones de ensayo, entre las que se incluyen: distintos tipos de instrumentos de ultrasonidos y transductores (CPC y DPC), operando con varias frecuencias de excitación, bases de medida (de 70 a 200 mm), modos de medición y de colocación de los sensores (con excentricidades hasta 55 mm); diferentes tipos de mezclas bituminosas de pavimentación (AC, SMA y PA), con distintas composiciones, macrotexturas y propiedades mecánicas; varias temperaturas del material durante el proceso de medición (entre 5 y 35 °C); diferentes espesores de firme asfáltico e incluso con presencia de interfases despegadas o con insuficiente adherencia; posibilidad de algún tipo de relleno y de agua en las grietas; y, por supuesto, un amplio rango de posibles profundidades de fisura (entre 0 y 70 mm).

La necesidad de comprobar estos modelos obtenidos en laboratorio sobre firmes en servicio ha requerido también la realización de **ensayos con ultrasonidos in situ** (cuatro campañas) acompañados con la **extracción de testigos** del firme sobre dichas grietas, para lo cual ha sido necesario llevar a cabo previamente extensivas campañas de inspección y evaluación de los deterioros de tipo fisuración sobre los firmes investigados.

De estos últimos estudios se ha obtenido una valiosa información consistente en datos empíricos sobre el

deterioro por TDC y su afección. Con los datos registrados en las mediciones y testificación sobre pavimentos se ha podido **evaluar la aplicación práctica** de esta metodología no destructiva y **estimar las incertidumbres** de los modelos calibrados propuestos para la auscultación de la profundidad de las fisuras, verificando la posibilidad de su utilización sistemática como técnica de auscultación integrante de un sistema de gestión de firmes.

2.1. Técnica de autocalibración

Se ha aplicado el método más sencillo entre las técnicas que emplean ultrasonidos, consistente en el análisis de la velocidad del pulso ultrasónico (*"Ultrasonic Pulse Velocity"*, UPV) en el dominio del tiempo, midiendo en modos tiempo de transmisión (*"time-of-flight"*) y velocidad de propagación de las ondas elásticas en ensayos transitorios. La configuración o esquema utilizado consiste en la realización de las medidas de transmisión del pulso sobre una sola cara del material (única superficie accesible en el caso de los pavimentos), lo cual hace intervenir tanto a ondas elásticas de superficie como a ondas que se propagan a través de la masa del material.

Con el fin de minimizar algunos de los problemas asociados a las dificultades de acoplamiento entre los transductores y la superficie de la mezcla asfáltica, se ha utilizado un procedimiento de autocalibración. Esto permite autocompensar dichos errores de medición, así como los provocados por las heterogenei-

dades internas y de la superficie del material, evitándose la necesidad de una calibración local previa. Además posibilita obviar el conocimiento inicial de las propiedades mecánicas y de la velocidad de propagación en el material ensayado, así como de las características de las ondas empleadas, al basarse en ratios de mediciones donde dichas propiedades se mantienen hipotéticamente constantes.

La técnica aplicada es una variante simplificada del método de autocalibración FTC (*Fourier Transmission Coefficient*), anteriormente aplicado principalmente sobre materiales metálicos y placas de hormigón (Achenbach et al., 1992; Popovic et al., 1998; Popovic et al., 2000). La simplificación del método anterior ha consistido en realizar exclusivamente dos tipos de mediciones: una de ellas en sentido longitudinal a la fisura (sobre material sano, a unos 5-10 cm de ésta) y la otra en sentido transversal, con los traductores cruzando la grieta (ver Figura 5). Esta última medida obtiene el tiempo requerido por las ondas generadas en el emisor sobre la superficie a un lado de la fisura para alcanzar el vértice inferior de ésta, difractarse en torno a él y ser de nuevo capturadas por el receptor montado también sobre la superficie al otro lado. Con ambas medidas se calcula su ratio o cociente, que representa físicamente un coeficiente de transmisión en la propagación del pulso ultrasónico debido a la presencia de la fisura, la cual intercepta la propagación de las ondas por la superficie del material. Además de minimizar el efecto de aquellos factores influyentes que actúan de la misma manera sobre los resultados

de ambas mediciones (mediciones relativas o auto-compensadas), según algunos estudios previos sobre otros materiales, las relaciones calculadas no se ven afectadas por la achura de la grieta ni por la forma de su punta (Popovic et al., 2000).

Para la aplicación de la técnica se asume la propagación de las ondas elásticas en un semiespacio según el método de la acústica geométrica basado en rayos lineales. Éstos representan las direcciones principales de propagación de los frentes de ondas. De acuerdo con la Figura 5, suponiendo una velocidad de propagación constante en todo el recorrido de la onda (medio homogéneo) y puesto que la distancia entre transductores también se mantiene constante en las dos medidas:

$$\left. \begin{aligned} V_L &= B/t_L \\ V_T &= B/t_T \end{aligned} \right\} \rightarrow \frac{V_T}{V_L} = \frac{t_L}{t_T} \quad (\text{Ec. 1})$$

siendo:

B = Base o distancia lineal entre ejes de transductores;
 V_L ; V_T = velocidad media del pulso en la medida longitudinal y transversal a la fisura, respectivamente;
 t_L ; t_T = tiempo de transmisión del pulso entre ambos transductores en la medida longitudinal y transversal a la fisura, respectivamente.

Resulta preciso hacer notar que V_T es en realidad una velocidad aparente, mientras que V_L (en el ensayo longitudinal) es una velocidad real. Ya que esta última puede suponerse constante en el mismo material bajo

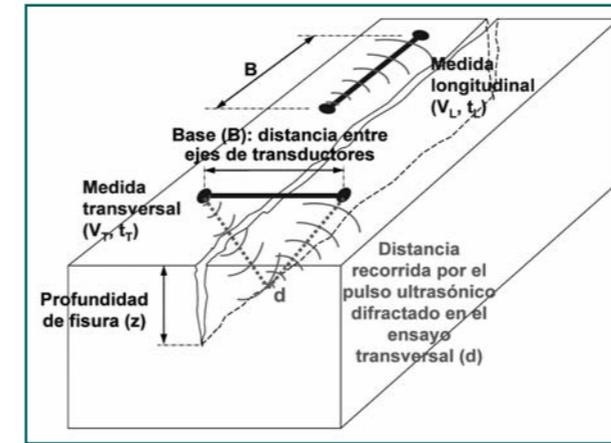


Figura 5.- Esquema de las mediciones longitudinal y transversal a la fisura para la aplicación de la técnica de autocalibración empleada.

las mismas condiciones de temperatura (homogeneidad) e igual en todas las direcciones (asumiendo isotropía de la mezcla asfáltica en estos pequeños espesores de capa), se puede calcular fácilmente la relación entre las distancias recorridas por ambas ondas (longitudinal y transversal) y demostrar que resulta directamente proporcional al ratio entre los correspondientes tiempos de transmisión, o inversamente proporcional a la relación entre sus velocidades aparentes:

$$\frac{B}{d} = \frac{V_T}{V_L} = \frac{t_L}{t_T} \quad (\text{Ec. 2})$$

donde:

d = distancia recorrida por la onda ultrasónica difractada en el ensayo transversal.

2.2. Materiales y preparación de probetas

La investigación se ha realizado sobre tres tipos de mezclas bituminosas en caliente (MBC) habitualmente empleadas en capas de rodadura como son las de tipo hormigón bituminoso (AC), las *Stone Mastic Asphalt* (SMA)¹ y las mezclas denantes (PA). Estos tipos de mezclas presentan granulometrías, porcentajes de huecos y macrotexturas bastante diferentes entre sí. Además, se han empleado dos tipos de ligantes y también áridos de dos diferentes naturalezas y procedencias, por lo que los resultados obtenidos resultan representativos del comportamiento de los ultrasonidos en un amplio espectro de materiales usados en pavimentación.

La formulación de las mezclas AC y PA ensayadas se ajusta a las especificaciones españolas establecidas en el PG-3 (O.C. 24/2008), en particular a sus husos granulométricos. La de tipo SMA se ha formulado de acuerdo con la UNE EN 13108-5. A continuación se resumen algunas de las características principales de éstas.

En el conjunto de las dos campañas de ensayos de laboratorio efectuadas se han preparado siete series

¹ Las mezclas tipo SMA, aunque hasta la fecha no son habituales para capas de rodadura en España como por ejemplo las discontinuas tipo BBTM, sí son utilizadas frecuentemente en otros países. Por este motivo han sido elegidas como uno de los materiales a estudiar en esta investigación. Por otra parte, a efectos de propagación de las ondas elásticas, los posibles modelos para mezclas tipo BBTM pueden interpolarse como un caso intermedio entre las AC y las PA.

	Material a: AC16 surf 50/70 S	Material b: SMA 11 50/70	Material c: PA 11 BM-3c
Árido fino	Calizo	Calizo	Calizo
Árido grueso	Calizo	Pórfido	Pórfido
Contenido de betún s./ áridos (%)	4,8	7,0	4,6
Tipo de ligante	B50/70	B50/70	BMP tipo BM-3c
Contenido de fibras de celulosa (%)	-	0,4	-
Densidad máxima (g/cm ³) UNE-EN 12697-5	2,283	2,479	2,555
Densidad aparente (g/cm ³) UNE-EN 12697-6 Procedimiento B (SSD):	2,210	2,398	-
Densidad aparente (g/cm ³) UNE-EN 12697-6 Procedimiento D (por dimensiones)	-	-	2,021
Huecos de aire (%) UNE-EN 12697-8	5,54	3,27	20,9

Tabla 1.- Tipos de mezclas bituminosas en caliente utilizadas en la investigación para la fabricación de probetas de laboratorio y resumen de sus propiedades.

de probetas (para los tres materiales) compactadas con forma de placas cuadradas, similares a las utilizadas para los ensayos de rodadura, de dimensiones 300 mm x 300 mm x 50 mm (espesor). Con estas probetas básicas se procedió a generar las diferentes probetas paralelepípedicas mediante corte de las anteriores, obteniéndose elementos de longitud 300±5 mm, alturas de 150±1 mm, 80±1 mm y 60±1 mm, y espesor o canto de 50±1 mm (como puede verse en el esquema de la Figura 6), sobre las que se efectuaron los ensayos con ultrasonidos. En total han sido ensayadas 70 probetas en el laboratorio.

2.3. Equipos de ultrasonidos

Debido a la naturaleza heterogénea y propiedades viscoelásticas de las mezclas asfálticas, que provocan alta atenuación de las ondas (por fenómenos de absorción y dispersión), y al tamaño de los defectos investigados, se precisan altas energías de pulso y relativamente bajas frecuencias de excitación, si bien las más altas frecuencias presentarían mejor directividad y una superior sensibilidad y resolución. En hormigones convencionales de cemento las frecuencias empleadas suelen ser inferiores a 100-150 kHz para evitar los altos

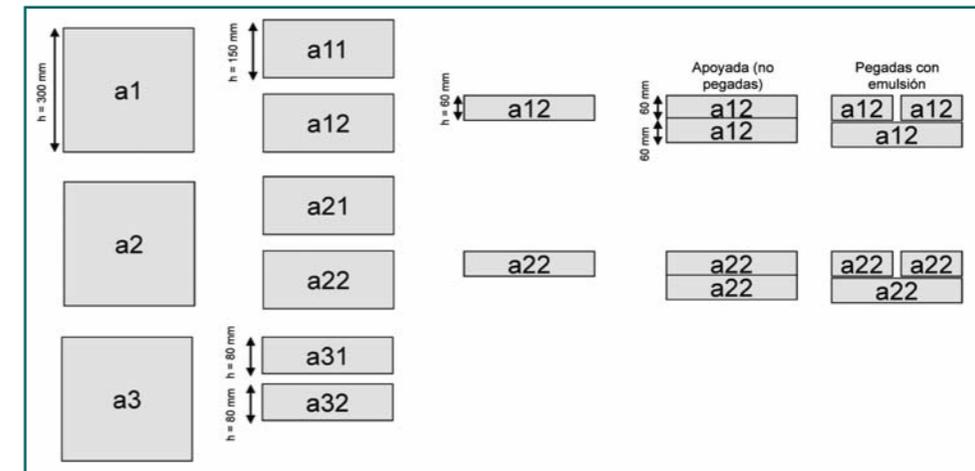


Figura 6.- Croquis de algunas probetas de la Serie a (Material a, MBC tipo AC16 surf 50/70 S) obtenidas a partir de las placas de 300 mm x 300 mm x 50 mm. 2ª Campaña.

niveles de ruido coherente (por la microestructura). Además, las frecuencias deberían reducirse a medida que aumenta la profundidad de las fisuras y la temperatura, por los efectos de la dispersión de ondas. Por ello, uno de los objetivos de la investigación en laboratorio era verificar las frecuencias empleadas (entre 50 y 70 kHz), las cuales se han demostrado eficaces para operar con este tipo de materiales bituminosos.

El aparato de ultrasonidos con transductores tipo DPC utilizado en este estudio (denominado comercialmente *Ultrasonic Tester JME UK1401*) es un equipo de alta portabilidad por sus muy reducidas dimensiones y está equipado con dos transductores de contacto seco separados 150 mm (Base). Cada transductor puede actuar como receptor o transmisor. El

dispositivo mide los tiempos (en μ s) de propagación de las ondas ultrasónicas longitudinales en el material en que se apoyan los transductores (si opera en modo tiempo) y puede reconvertir mediante un sencillo cálculo interno tal medición en velocidad de propagación (en m/s) de la señal (si opera en modo velocidad). Este tipo de aparatos de ultrasonidos con transductores de contacto seco ha sido aplicado por primera vez en España sobre mezclas asfálticas en la presente investigación. El otro instrumento de ultrasonidos empleado (*Ultrasonic Tester Steinkamp BP-5*) es un equipo convencional con transductores CPC de configuración cilíndrica, con caras planas y que requieren la utilización de un medio o sustancia que asegure la transmisión acústica entre dicha cara y la superficie del material ensayado.

Denominación del dispositivo:	Ultrasonic Tester JME UK1401	Ultrasonic Tester STEINKAMP BP-5
Fabricante	Acoustic Control Systems (Rusia)	Steinkamp (Alemania)
Tipo de transductores	DPC	CPC
Distancia entre transductores (Base)	150 mm	A elegir por el operador
Frecuencia de pulsos ultrasónicos	70 kHz	50 kHz
Apreciación en medida de tiempos	0,1 μ s	0,1 μ s
Rango de medidas en modo tiempos	15 μ s – 100 μ s	0,1 μ s – 9999,9 μ s
Rango de medidas en modo velocidades	1500 m/s – 9999 m/s	-
Dimensiones	181 mm x 65 mm x 31 mm	220 mm x 175 x 60 mm
Diámetro de los transductores	-	27 mm
Temperaturas de operación	-20 a +50 °C	-20 a +50 °C
Peso	350 g (sin baterías)	830 g (con transductores)

Tabla 2.- Características principales de los equipos de ultrasonidos empleados en la investigación.

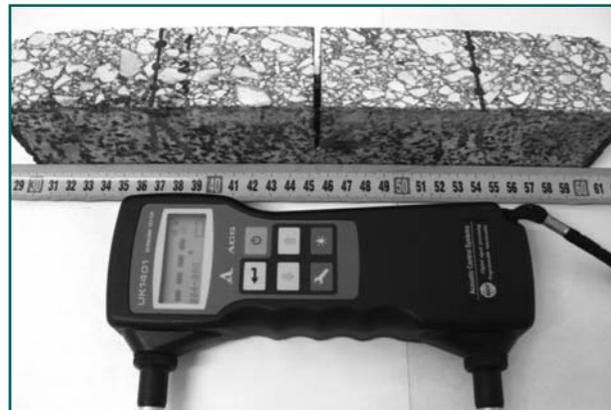


Figura 7.- Aparatos de ultrasonidos utilizados en la investigación: a) Instrumento JME UK1401 con transductores tipo DPC; b) Equipo STEINKAMP BP-5 con transductores CPC.

2.4. Mediciones con ultrasonidos en laboratorio

Sobre las probetas prismáticas se registraron las medidas en ensayos de velocidades aparentes de propagación (en la primera de las campañas efectuadas) y de tiempos de transmisión del pulso ultrasónico (en la segunda campaña de laboratorio).

De acuerdo con el análisis estadístico de la desviación estándar de los resultados de las mediciones en el conjunto de todas las campañas de laboratorio efectuadas, cuyo resumen se presenta en la Tabla 3, para limitar los errores aleatorios en la estimación del promedio del tiempo de transmisión se precisa un mínimo número de mediciones repetidas en las mismas condiciones experimentales (tamaño muestral) comprendido entre 9 y 12 medidas/probeta, dependiendo del tipo de MBC, para el instrumento de transductores de contacto seco y de 6 para el de transductores convencionales CPC (para un nivel de confianza del 95%).

Los ensayos con ultrasonidos han sido efectuados en unos casos sobre superficies pulidas (cantos laterales del corte de las probetas en placa) y en otros sobre superficies de macrotextura rugosa (cara superior de las probetas en el molde de compactación) en las diferentes condiciones previstas de profundidades de fisura, bases de medida (B), excentricidad de la posición de transductores con relación al eje de la fisura (e), adherencias entre capas, rellenos en el interior de la grieta de agua y arena saturada, etc. Las medidas se han realizado a tres diferentes temperaturas (5, 20 y 35 °C) en el interior de una cámara termostática con control automático y recirculación interior de aire. Estas temperaturas de ensayo se han alcanzado utilizando un calefactor-refrigerador digitalmente controlado, manteniendo las probetas un mínimo de 4 horas a temperatura constante (± 1 °C). Las posiciones de medida en cada probeta han sido previamente marcadas paralelamente al plano de la entalla para asegurar la repetibilidad en las posiciones de colocación de los

		UK1401 (DPC)	BP-5 (CPC)
Promedio de la Desviación Estándar muestral (s)	Material a (AC16 S)	1,2 μ s	0,1 μ s
	Material b (SMA 11)	2,7 μ s	0,2 μ s
	Material c (PA 11)	2,2 μ s	0,2 μ s
Promedio del Coeficiente de Variación	Material a (AC16 S)	3,48%	0,27%
	Material b (SMA 11)	5,72%	0,35%
	Material c (PA 11)	3,02%	0,37%

Tabla 3.- Promedios globales de las desviaciones estándar y coeficientes de variación de los tiempos de propagación en probetas de laboratorio.

sensores, especialmente con los de contacto puntual, debido a la heterogeneidad de las mezclas asfálticas, como muestra la Figura 8. Las fisuras se han simulado por medio de entalladuras progresivas de unos 3-4 mm de anchura realizadas con sierra circular. Las profundidades ensayadas han sido 0 (sin fisura), 25, 40, 50, 60 y 70 mm, con precisión de ± 1 mm. Considerando todas las condiciones empíricas ensayadas, en total se han registrado 5247 mediciones individuales con ultrasonidos con el instrumento UK1401 y 10080 con el BP-5, por lo que es posible afirmar que los resultados obtenidos están sustentados por muy amplias campañas de investigación en laboratorio.

Dado que los tradicionales medios de acoplamiento para transductores CPC, como grasas o ceras, no resul-

tan adecuados sobre las superficies muy irregulares y porosas de las mezclas bituminosas, uno de los objetivos de la investigación ha sido encontrar un material diferente para esta función. En las campañas de ensayos efectuadas en este estudio, tanto de laboratorio como in situ, se ha podido comprobar que el empleo de láminas de masilla plástica de 2-3 mm de espesor posibilita una adecuada transmisión del pulso ultrasónico con los transductores de contacto plano (Fig. 9), adaptándose perfectamente a las irregularidades características de las MBC y bajo presiones de contacto reducidas. Este material puede además reutilizarse para la realización de numerosas medidas y garantiza la limpieza, rapidez y operatividad del proceso.



Figura 8.- Medición de tiempos de transmisión de ultrasonidos sobre probetas de laboratorio con aparato de transductores DPC (UK1401): a) Probeta de SMA 11, $h=150$ mm, $z=50$ mm; b) Probeta de AC16 S, $h=150$ mm, $z=50$ mm.

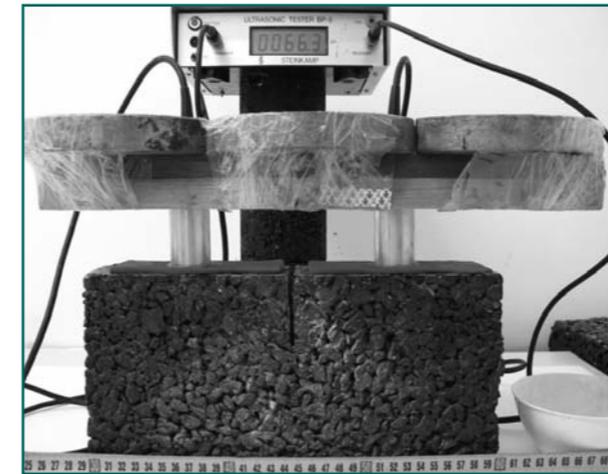


Figura 9.- Medición de tiempos de transmisión de ultrasonidos sobre probetas de laboratorio con aparato de transductores CPC (BP-5); $B=150$ mm: a) Probeta de PA 11, $h=150$ mm, $z=50$ mm; b) Probeta de AC16 S, $h=60+60$ mm pegadas, $z=60$ mm.

3. Deducción de modelos teóricos

Los métodos no destructivos de caracterización de materiales y detección de defectos basados en el análisis de la propagación de ondas elásticas transitorias requieren inicialmente el establecimiento de un modelo previo, de acuerdo con la geometría del problema y los contornos del medio de propagación en cada caso, que pueda simular dichos fenómenos en el material objeto de estudio. La suposición inicial de modelos de propagación, aun siendo solamente aproximados, es condición necesaria para poder interpretar y evaluar posteriormente los resultados empíricos. Sin embargo, hasta la presente investigación no habían sido postulados modelos teóricos, ni analíticos ni numéricos, sobre la utilización de técnicas ultrasónicas de autocalibración en mezclas bituminosas.

Los modelos teóricos planteados en este trabajo han sido deducidos algebraicamente mediante la resolución simplificada del problema geométrico de la propagación de las ondas ultrasónicas entre los dos transductores (apoyados sobre la superficie del pavimento) en un semiespacio constituido por un medio asimilable a los materiales objeto de estudio e interceptado por una fisura descendente abierta en su superficie. Para ello se han asumido una serie de hipótesis simplificadoras: suposición de propagación lineal de los frentes de ondas como rayos acústicos y transmisión del pulso por difracción en torno al vértice de la fisura; material homogéneo e isótropo

(velocidad constante de las ondas); y, finalmente, no consideración de los efectos de los fenómenos de dispersión y atenuación de las ondas. Bajo estos postulados se han calculado los modelos aproximados para la determinación del tiempo de transmisión de los ultrasonidos ante la presencia de una TDC, así como las expresiones para el coeficiente de transmisión al aplicar la técnica de autocalibración. En el planteamiento matemático de los modelos se ha analizado el efecto de diferentes variables geométricas (profundidad e inclinación de la fisura; separación, diámetro y excentricidad de los transductores) así como de las propiedades mecánicas del material (por ejemplo, la presencia de capas con muy diferentes rigideces).

De acuerdo con la anterior (Ec. 2), la profundidad de una fisura descendente puede ser teóricamente calculada a partir del ratio de transmisión de los tiempos o velocidades de propagación de la señal ultrasónica puesto que, según la geometría representada en la Figura 10, y asumiendo las hipótesis anteriormente postuladas, la relación entre la distancia (d) recorrida por el frente de ondas en el ensayo transversal y la profundidad de la grieta (z), para una fisura con un ángulo de inclinación (ϕ) resulta:

$$d = d_1 + d_2 = \sqrt{z^2 + \left(\frac{B}{2} + \frac{z}{\operatorname{tg}\phi}\right)^2} + \sqrt{z^2 + \left(\frac{B}{2} - \frac{z}{\operatorname{tg}\phi}\right)^2} \quad (\text{Ec. 3})$$

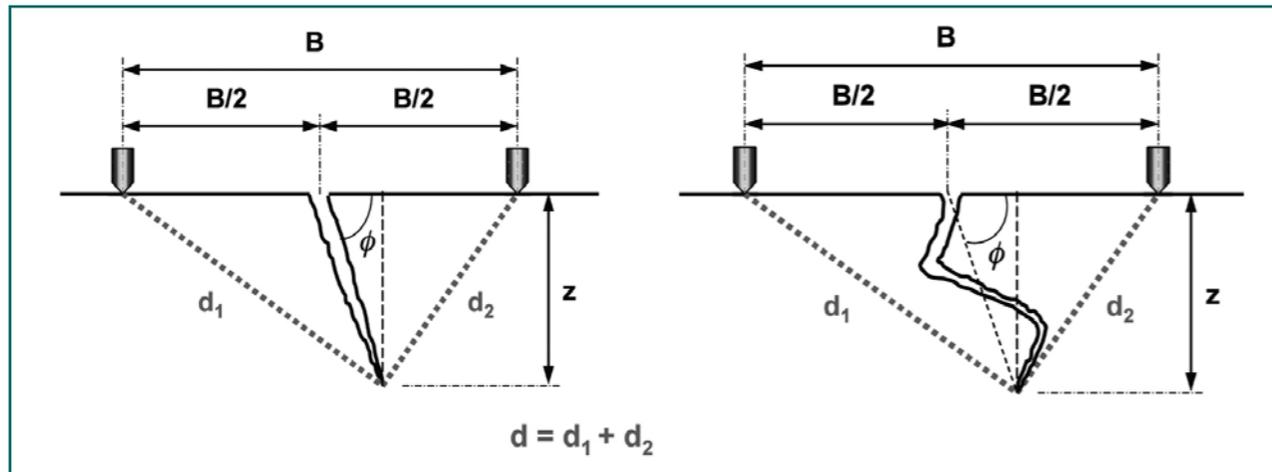


Figura 10.- Geometría considerada, y posibles morfologías de grieta, en la propagación de la onda en el ensayo transversal a la fisura para la deducción del modelo teórico simplificado.

De la combinación de las ecuaciones (Ec. 2) y (Ec. 3) se obtiene el siguiente modelo de transmisión teórico:

$$\left(\frac{t_L}{t_T}\right) = \left(\frac{V_T}{V_L}\right) = \frac{B}{\sqrt{z^2 + \left(\frac{B}{2} + \frac{z}{\operatorname{tg}\phi}\right)^2} + \sqrt{z^2 + \left(\frac{B}{2} - \frac{z}{\operatorname{tg}\phi}\right)^2}} \quad (\text{Ec. 4})$$

Para fisuras que sean completamente verticales ($1/\operatorname{tg}\phi=0$), la función anterior puede simplificarse como sigue:

$$\left(\frac{t_L}{t_T}\right) = \left(\frac{V_T}{V_L}\right) = \frac{B}{\sqrt{B^2 + 4 \cdot z^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 4 \cdot (z/B)^2}} \quad (\text{Ec. 5})$$

En su aplicación práctica sobre las fisuras de un firme, dado que a priori la inclinación de la grieta es desconocida, resulta necesario limitar la profundidad máxima de las fisuras a las que resulta aplicable este modelo teórico, dependiendo de la base de medida y de la inclinación de dichas discontinuidades. El análisis matemático de la función dada por (Ec. 4) permite deducir que resulta preciso restringir su aplicación a profundidades relativas de fisura (z/B) que cumplan: $(z/B) \leq 0,25$ a $0,30$, para inclinaciones máximas respecto de la horizontal entre 45° y 60° (valores que no suelen superarse de acuerdo con la experiencia obtenida de la testificación in situ). De la misma manera, el análisis de elasticidad de dicha función ha posibilitado estimar el error relativo de los modelos de predicción de la profundidad de las grietas a partir de los valores del coeficiente de transmisión (t_L/t_T) medidos, estableciéndose la recomendación de proporcionalidad entre la (z) de las fisuras que se pretenden auscultar y la base

(B) utilizada. En cualquier caso, con las bases más anchas siempre la estimación de la profundidad de las fisuras estará sometida a mayores incertidumbres relativas ante los posibles errores en la medida del ratio (un error del 1% en los ratios puede traducirse en estos casos en un error entre el 1,1% y el 2% en la predicción de la profundidad absoluta de la grieta). Por el contrario, las fisuras más someras se auscultarán generalmente con bases más estrechas; en este caso el error relativo debido a la aplicación de los modelos de predicción resulta menor (entre el 0,4% y el 1,2%).

La influencia del efecto del diámetro de los transductores CPC sobre el modelo de propagación simplificado propuesto, al modificar el posible recorrido con distancia mínima de la onda, también ha sido estudiada analíticamente, demostrándose que resulta necesario establecer un límite al máximo diámetro relativo (D/B) admisible en función de la profundidad relativa

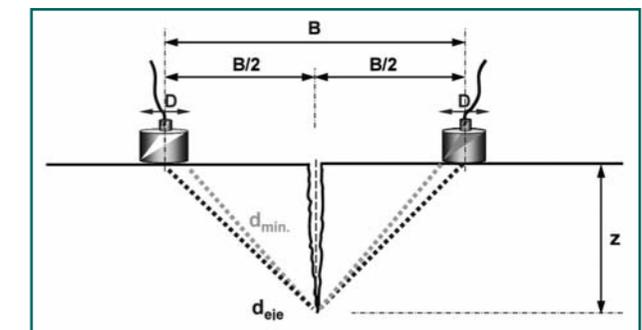


Figura 11.- Geometría considerada para la deducción del efecto del diámetro de los transductores CPC utilizados sobre el ratio de transmisión teórico.

Profundidad relativa de fisura, z/B	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
Diámetro relativo máximo, D/B	≤0,48	≤0,35	≤0,25	≤0,20	≤0,16	≤0,13	≤0,12

Tabla 4.- Limitación del diámetro de los transductores para que el error relativo sobre los ratios de transmisión medidos con ultrasonidos no supere el 5%.

de fisura según la Tabla 4, de manera que el error o diferencia porcentual entre la distancia desde el eje de ambos transductores y la mínima posible de recorrido no supere un cierto valor.

El modelo teórico para el tiempo de transmisión del pulso en el ensayo transversal, asumiendo las mismas condiciones geométricas representadas en la anterior Figura 10, se puede expresar de acuerdo con la (Ec. 6):

$$t_T (\mu s) = \frac{\sqrt{B(mm)^2 + 4 \cdot z(mm)^2}}{V_L (m/s)} \cdot 10^3 \quad (Ec. 6)$$

Si ambos transductores no están colocados en posición simétrica con relación al punto de intersección de la fisura con la superficie del pavimento, sino con cierta excentricidad (e), la distancia recorrida por la onda en el ensayo transversal aumenta con relación a la anterior situación (Fig. 12). En estas condiciones, se ha demostrado que los ratios $t_{(excéntrico)}/t_{(eje)}$ crecen rápidamente con el valor de la excentricidad en el caso de las bases de medida más reducidas. Este incremento es además mayor cuanto más grande sea la profundidad vertical de la fisura. Por ello, en el siguiente apartado 4.2.3 se establecerán recomendaciones sobre los límites para la excentricidad máxima admisible durante las mediciones, basándose en este

modelo teórico comprobado mediante los resultados experimentales de laboratorio.

Finalmente, se ha verificado analíticamente la validez de los modelos de propagación en el caso de la presencia de capas inferiores del firme con mayor rigidez que la capa superficial en la que se encuentra confinada la fisura. Este fenómeno en teoría podría producirse con estructuras de firme que contengan capas inferiores muy rígidas, como por ejemplo mezclas asfálticas de alto módulo (MAM), bases tratadas o incluso de hormi-

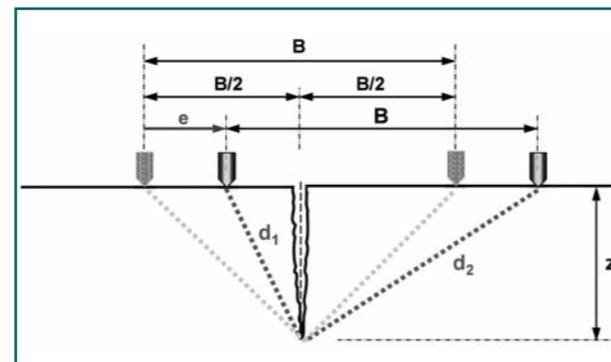


Figura 12.- Geometría considerada para la deducción del modelo teórico correspondiente a la propagación de la onda en el ensayo transversal a la fisura en el caso de posición excéntrica de los transductores.

Para $(z/B)_{máx.}=0,30$	$R_V=V_2/V_1$	1,1	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4
	$(h_1/B)_{mín.}$	>0,31	>0,30	>0,32	>0,34	>0,37	>0,38	>0,40	>0,41

Tabla 5.- Condición exigible a la base de medida para el cumplimiento del modelo de propagación de las ondas mediante difracción en el vértice inferior de la fisura.

gón para firmes. En consecuencia, se han investigado analíticamente las condiciones que deberían verificarse para que pudiesen alcanzar antes el receptor algunas ondas que se propagasen por estas capas inferiores a mayor velocidad, aún siendo la longitud total recorrida en este caso superior (Fig. 13) y se ha podido demostrar matemáticamente que, al menos en teoría, puede darse tal situación con valores reducidos de espesor de capa superficial con relación a la base de medida empleada

(h_1/B) , elevadas relaciones entre las velocidades de propagación en ambas capas ($R_V=V_2/V_1$) e importantes profundidades relativas de fisura (z/B).

De acuerdo con el análisis, se ha determinado que es preciso adoptar una base de medida adecuada en cada caso de manera que la relación (h_1/B) no sea inferior a los valores especificados en la siguiente Tabla 5 en función de la relaciones entre las velocidades de propagación en ambas capas (R_V), lo que conduce a la necesidad de limitar las bases de medida con ultrasonidos en estos casos.

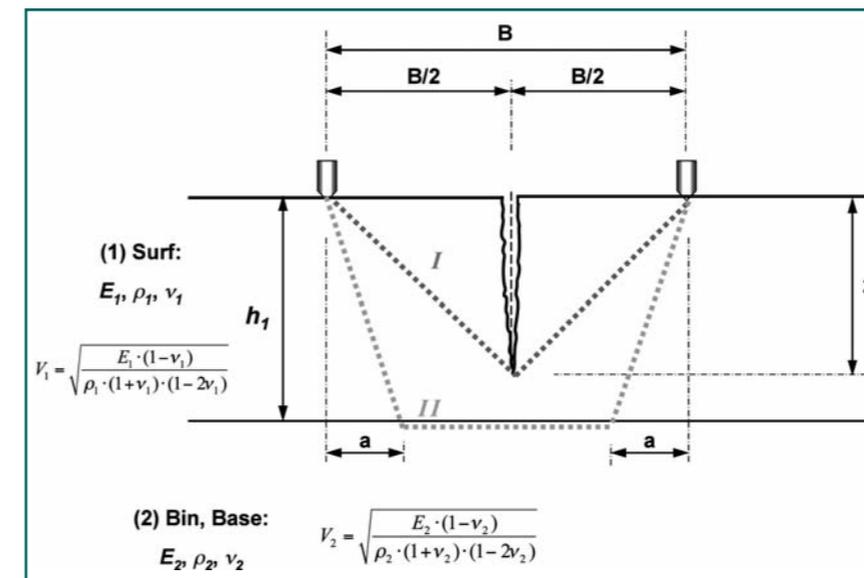


Figura 13.- Representación esquemática de la posible propagación del pulso ultrasonido en el ensayo transversal a la fisura a través de capas inferiores más rígidas.

4. Resultados experimentales en laboratorio y discusión

4.1. Velocidades y tiempos de propagación de ultrasonidos

Cada grupo de medidas de tiempos o velocidades de propagación registradas sobre la misma probeta en las mismas condiciones experimentales han sido promediadas aritméticamente y calculados la desviación estándar muestral (s) y el coeficiente de variación, cuyos valores medios en el conjunto de todas las campañas experimentales se han resumido en la anterior Tabla 3. En todas las series de ensayos estos resultados muestran una razonable repetibilidad en el

caso del instrumento dotado de transductores DPC y excelente precisión con el de transductores CPC, si bien no resultan homogéneos para los tres tipos de MBC, presentando mayor dispersión los materiales de mayor discontinuidad granulométrica, según dicho análisis estadístico.

Los valores promedios de las anteriores mediciones han sido corregidos de los errores sistemáticos estimados previamente mediante calibración de cada instrumento de ultrasonidos con su correspondiente patrón de referencia, si bien el procedimiento de auto-calibración permitiría autocompensar este sesgo. Como puede observarse en la Tabla 6 siguiente, las velocidades medias registradas sobre probetas no entalladas (ondas propagadas a través de la superficie) han estado comprendidas, para el caso de $B=150$ mm,

		UK1401 (DPC); f=70 kHz			BP-5 (CPC); f=50 kHz		
		5 °C	20 °C	35 °C	5 °C	20 °C	35 °C
Velocidad media sin fisura V_L (m/s)	Material a	4434	4170	3869	4421	4160	3944
	Material b	3933	3658	3357	4087	3737	3450
	Material c	3334	3078	2786	3576	3221	2903
Longitud de onda (m)	Material a	$6,27 \cdot 10^{-2}$	$5,96 \cdot 10^{-2}$	$5,53 \cdot 10^{-2}$	$8,84 \cdot 10^{-2}$	$8,32 \cdot 10^{-2}$	$7,89 \cdot 10^{-2}$
	Material b	$5,62 \cdot 10^{-2}$	$5,23 \cdot 10^{-2}$	$4,80 \cdot 10^{-2}$	$8,17 \cdot 10^{-2}$	$7,47 \cdot 10^{-2}$	$6,90 \cdot 10^{-2}$
	Material c	$4,76 \cdot 10^{-2}$	$4,40 \cdot 10^{-2}$	$3,98 \cdot 10^{-2}$	$7,15 \cdot 10^{-2}$	$6,44 \cdot 10^{-2}$	$5,81 \cdot 10^{-2}$

Tabla 6.- Promedio de la velocidad de propagación de ultrasonidos (ondas superficiales) en el material sin fisurar a cada temperatura y longitudes de onda resultantes para ambos instrumentos de ultrasonidos.

entre 3869 m/s (35 °C) y 4434 m/s (5 °C) para la MBC tipo AC (material *a*), entre 3357 m/s (35 °C) y 4087 m/s (5 °C) para el SMA (material *b*), y entre 2786 m/s (35 °C) y 3576 m/s (5 °C) para la MBC tipo PA (material *c*).

4.1.1. Influencia de la profundidad de la fisura y de la temperatura

La presencia de las fisuras se ha traducido en todos los casos en un incremento de los tiempos de transmisión (disminución de las velocidades aparentes) en las medidas transversales a éstas. En el caso de los valores registrados en función de la profundidad de fisura con el instrumento UK1401 (transductores DPC), los promedios de los tiempos de propagación se ajustan al modelo teórico (Ec. 6) hasta cierta profundidad de fisura máxima. Sin embargo, en general para valores de $z/B > 0,4$ ($T=5$ °C), $z/B > 0,34$ ($T=20$ °C) y $z/B > 0,17$ ($T=35$ °C), en el caso del material *a*; $z/B > 0,27$ ($T=5$ y 20 °C) y $z/B > 0,17$ ($T=35$ °C), para los materiales *b* y *c*, se ha observado un repentino y acusado incremento de los tiempos medidos en laboratorio con respecto al correspondiente modelo deducido analíticamente (ver Fig. 14).

Una posible explicación para este fenómeno observado podría encontrarse en los efectos de dispersión en campo cercano de las ondas debido a su interacción con la fisura y a las múltiples interferencias que se producen en esa zona entre las ondas superficiales incidentes, las reflejadas por la fisura vertical y las que se propagan a través del material. Esto provoca

modificaciones de la señal tanto en el campo cercano anterior como posterior a la posición de la grieta. El tamaño de este campo de dispersión próximo a la grieta depende de la profundidad de ésta y de la longitud de onda de las señales incidentes, es decir de la **profundidad normalizada de fisura** (z/λ ; siendo λ =longitud de onda). Cuando la profundidad de la fisura es mucho menor que la longitud de onda, las componentes de onda dominantes (máxima amplitud) son las ondas superficiales de Rayleigh (ondas *R*) reflejadas por la fisura y las ondas *R* transmitidas tras la interacción de las ondas *R* incidentes con la grieta. Las frecuencias componentes más bajas se pueden transmitir al otro lado de la fisura (difractándose en su vértice), mientras que la mayoría de las componentes de alta frecuencia son reflejadas hacia atrás. Si los transductores se encuentran situados dentro del mencionado campo cercano incluso puede producirse un incremento de la amplitud de la señal recibida tanto en el campo anterior como posterior a la grieta, lo que afectaría al pulso que llega al receptor por la interacción entre las ondas resultantes de los procesos de conversión de modos (ondas de cuerpo y ondas multi-reflejadas) y las incidentes (Kee & Zhu, 2010).

Por el contrario, para fisuras profundas ($z/\lambda \approx 1$) la mayor parte de las ondas incidentes son reflejadas y, por lo tanto, la señal registrada con este instrumento ha experimentado una marcada y brusca atenuación. Sin embargo, no todas las altas frecuencias sufren el mismo nivel de atenuación. En consecuencia, y como se ha podido comprobar con los resultados experi-

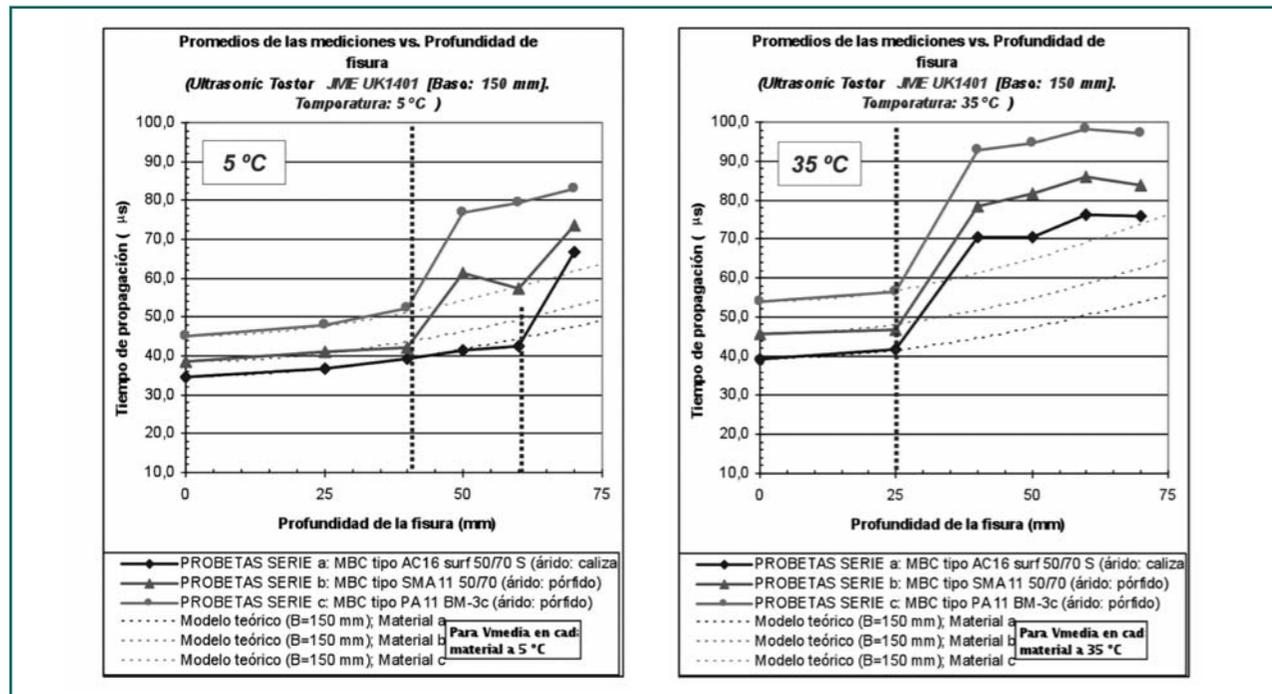


Figura 14.- *Tiempos de transmisión de ultrasonidos en función de la profundidad de la fisura para diferentes temperaturas. Comparación de los resultados experimentales en los tres materiales con el modelo de propagación teórico (Aparato UK1401; transductores DPC; $f=70$ kHz; $B=150$ mm).*

mentales (Fig. 14), los procesos de dispersión, interacción y cambios de fase que han experimentado las ondas difractadas producen modificaciones en los tiempos de propagación registrados (y con ello, como se verá posteriormente, también en los ratios de transmisión) dependiendo de las propiedades del medio (tipo de MBC y temperatura) y de las propias ondas, que pueden parametrizarse en términos de la variable

(z/λ), así como de aspectos geométricos o de contorno, principalmente el ángulo de difracción que experimentan las ondas en el vértice inferior de la fisura (relación z/B).

En el caso de los resultados con el aparato de transductores convencionales CPC, a diferencia de lo observado con el equipo anterior, no se ha detectado

experimentalmente dicha atenuación repentina de las ondas a partir de determinada profundidad de fisura, al menos dentro del rango investigado hasta 70 mm. Sin embargo, según se muestra en la Figura 15, en todos los casos los tiempos de transmisión de los ultrasonidos medidos en laboratorio tienden a ser algo superiores a los que proporcionaría su correspondiente modelo teórico simplificado. Este retardo en la propa-

gación de la onda es mayor cuanto más profunda es la fisura, menor la base de medida (mayor z/B) y más discontinua la granulometría del material (aparentemente más acentuado el efecto en la mezclas tipo PA). Si bien los mencionados procesos de dispersión dependen de las propiedades mecánicas del material, los resultados experimentales no han permitido, al menos en el rango de temperaturas ensayadas, obser-

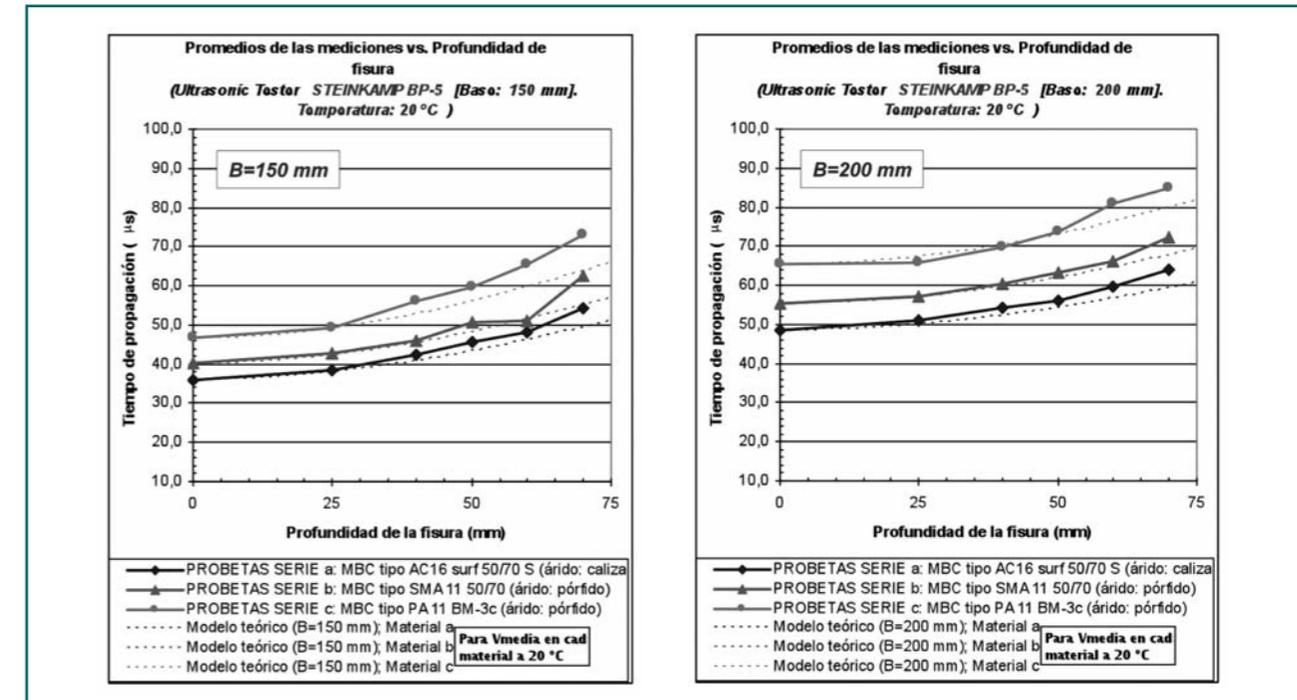


Figura 15.- *Tiempos de transmisión de ultrasonidos en función de la profundidad de la fisura para diferentes bases de medida. Comparación de los resultados experimentales en los tres materiales con el modelo de propagación teórico (Aparato BP-5; transductores CPC; $f=50$ kHz; $T=20$ °C).*

var tendencias definidas con relación a la influencia de esta variable (para un mismo material). Para lograr apreciar la influencia de la variable térmica ha sido necesario expresar los modelos en función de (z/λ) , siendo así representados los coeficientes de transmisión como se verá posteriormente.

4.1.2. Efecto de la existencia de capas del firme despegadas

Este efecto ha sido investigado en laboratorio comparando los resultados obtenidos sobre probetas fisuradas apoyadas sin adherencia sobre otras probetas, con los proporcionados por las mismas probetas pegadas con emulsión bituminosa. Todos los ensayos han demostrado que mientras la profundidad de las grietas no alcance la interfase entre capas despegadas o con insuficiente adherencia, la propagación de las ondas elásticas no se ve afectada por la existencia de dicha interfase. Estas **interfases sin adherencia** actúan como fisuras situadas en un plano horizontal por lo que **impiden la propagación** de las ondas ultrasónicas, incluso actuando sobre ellas fuertes presiones de contacto. Por el contrario, los riegos de adherencia entre capas bituminosas, si están correctamente ejecutados, permiten la propagación de los pulsos ultrasónicos entre las diferentes capas como si de un único medio continuo monolítico se tratase.

Cuando la profundidad de la entalladura de las probetas ha alcanzado la totalidad de su espesor todos los ensayos han mostrado claramente que la señal ul-

trasónica no puede transmitirse. Así, en las aplicaciones prácticas de esta técnica sobre pavimentos en servicio este hecho proporciona un **criterio para evaluar la extensión de la TDC**, es decir si la fisuración afecta o no a todo el espesor asfáltico, ya que si las medidas transversales proporcionan lecturas de velocidades aparentes distintas de cero es condición suficiente para que la grieta abierta en superficie sea de tipo descendente (pues aún no habría alcanzado el espesor completo).

4.1.3. Influencia del espesor de material asfáltico

Los promedios de los tiempos de transmisión medidos sobre probetas de 150 mm de altura han resultado prácticamente idénticos a los registrados sobre probetas de 60 mm, para la misma profundidad de entalladura a cualquier temperatura. El análisis de los resultados obtenidos en ambos casos ha sido llevado a cabo mediante pruebas estadísticas de hipótesis sobre la diferencia de las medias en ambos tipos de probetas, lo que ha permitido demostrarlo matemáticamente. Por tanto, la **independencia de los resultados con respecto al espesor de material asfáltico por debajo del punto más profundo de la fisura** ha sido comprobada experimentalmente, lo que verifica la hipótesis de propagación de las ondas elásticas por difracción bordeando el vértice de la grieta sin intervención de las reflejadas desde la cara inferior de la probeta en la señal capturada, lo cual constituye una conclusión muy importante para la aplicación práctica de esta técnica.

4.1.4. Efecto de la macrotextura superficial de la mezcla bituminosa

Las relaciones entre los tiempos de propagación medidos sobre superficie pulida t_p y sobre superficie rugosa t_r se resumen en las Figura 16, para los tres tipos de MBC ensayados, profundidades de fisura 0 y 25 mm y mediciones con equipo de transductores CPC (con el UK1401 se han obtenido resultados similares al BP-5 con $B=150$ mm). Todos los ensayos se han realizado a una única temperatura de 20 °C. Según estos resultados, la diferencia en los tiempos de transmisión con transductores apoyados sobre superficies pulidas con respecto a las superficies con la textura característica

de cada mezcla asfáltica llega a ser significativa para tamaños de fisura incipientes, a medida que se reduce la base de medida, especialmente en el caso del SMA. Con las mezclas tipo AC no parecen existir diferencias apreciables.

Consecuentemente, **las mediciones efectuadas sobre pavimentos in situ**, especialmente si están poco desgastados y constituidos por mezclas discontinuas con superficie de rodadura muy porosa y de macrotextura pronunciada, deben **multiplicarse por el coeficiente (t_p/t_r)** , correspondiente a dicho material, tamaño de fisura y base de medida, para obtener un resultado

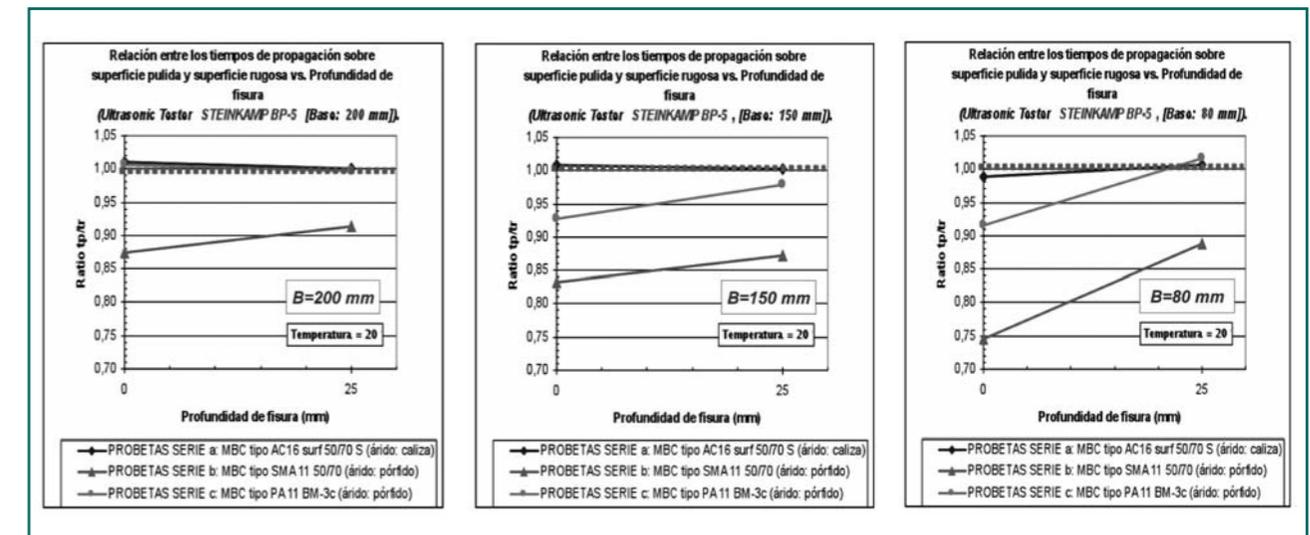


Figura 16.- Efecto de la macrotextura de la superficie de la MBC en los tiempos de propagación. Promedios de los ratios de transmisión en el conjunto de todas las probetas de cada material a $T=20$ °C para bases de 80, 150 y 200 mm (BP-5; transductores CPC; $f=50$ kHz).

	Profundidad de fisura z (mm)	BP-5 (CPC)				UK1401 (DPC)
		B=200 mm	B=150 mm	B=80 mm	B=70 mm	B=150 mm
Material a (AC16 S)	0 (ensayo longitudinal)	1,00	1,00	0,99	0,98	1,00
	25 (ensayo transversal)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Material b (SMA 11)	0 (ensayo longitudinal)	0,87	0,83	0,75	0,70	0,79
	25 (ensayo transversal)	0,91	0,87	0,89	0,90	0,85
Material c (PA 11)	0 (ensayo longitudinal)	1,00	0,93	0,92	1,00	0,95
	25 (ensayo transversal)	1,00	0,98	1,00	1,00	0,96

Tabla 7.- Resumen de los promedios de los ratios (t_p/t_r) de tiempos de propagación sobre superficie pulida y rugosa según resultados experimentales de laboratorio ($T=20\text{ }^\circ\text{C}$).

comparable con los obtenidos sobre las probetas de laboratorio utilizadas en esta investigación. Los coeficientes propuestos, obtenidos de la investigación experimental, se resumen en la Tabla 7.

4.2. Ratios de transmisión

4.2.1. Calibración del modelo teórico: dependencia de la profundidad de fisura y temperatura

Las relaciones entre los promedios de los tiempos de transmisión medidos sin fisura y con la probeta entallada ($t_0/t_z = (V_z/V_0)$) han sido representadas gráficamente para cada probeta en función de la profundidad normalizada (z/λ), en cada material, temperatura y base de medida. Algunos de dichos resultados se muestran en las Figuras 17 y 18, para cada equipo de

ultrasonidos. Estos ratios son equivalentes a los que se registrarían sobre un firme fisurado con las medidas longitudinal y transversal a la grieta ($t_L/t_T = (t_0/t_z)$) al aplicar la técnica de autocalibración.

Con los puntos experimentales se han efectuado ajustes de regresión mediante mínimos cuadrados aplicando el algoritmo iterativo de optimización de Levenberg–Marquardt (LM), el cual proporciona solución numérica al problema de minimización de una función no lineal en un espacio n -paramétrico. De esta manera se ha calibrado el modelo teórico simplificado deducido analíticamente (apartado 3) mediante los resultados experimentales y se consigue que el modelo finalmente propuesto tenga significado físico, es decir sea capaz de explicar el fenómeno observado, ya que se ha partido de un modelo inicial de propagación demostrado matemáticamente. Con objeto de

que además el modelo resultante sea lo más simple posible se ha elegido una función similar a la del teórico (Ec. 5) con un único parámetro de ajuste (m_1), dado por la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{t_0}{t_z}\right) = \frac{B/\lambda}{\sqrt{(B/\lambda)^2 + m_1 \cdot (z/\lambda)^2}} \quad (\text{Ec. 7})$$

Como se puede comprobar en la Figura 17, en el caso del equipo de ultrasonidos UK1401 (DPC), el anterior modelo se ajusta perfectamente a los resultados empíricos mientras la profundidad normalizada de fisura no supere determinados valores límite. Por lo tanto, para fisuras superficiales de pequeña profundidad el esquema de autocalibración utilizado ha resultado suficientemente eficaz para autocompensar los efectos de las propiedades del material (dichas propiedades no han tenido que ser previamente conocidas para obtener los ratios) y los posibles errores debido a la variabilidad en el acoplamiento o a heterogeneidades internas y superficiales de la MBC, posiblemente por la reducida importancia relativa en este caso de los fenómenos de dispersión para estas limitadas profundidades normalizadas. Incluso un leve incremento de los ratios de transmisión en relación con los predichos por el modelo simplificado puede observarse en las ramas superiores de algunas curvas de ajuste, atribuible al aumento de la amplitud de la señal en el campo más próximo a la entalladura.

Sin embargo, debido a los mencionados fenómenos de dispersión en frecuencias y atenuaciones durante la difracción de las ondas, los coeficientes de trans-

misión medidos con este aparato experimentan una repentina y marcada atenuación por encima de determinados valores de profundidad normalizada crítica (variables con el tipo de material y temperatura) con respecto al modelo teórico, como también muestra la Figura 17, variación que ya fue observada al analizar los tiempos de transmisión en relación con (z/B) (aptdo. 4.1.1). Esto significa que en estos casos el procedimiento de autocalibración no ha sido capaz de compensar completamente la influencia de la profundidad de la grieta y de la temperatura sobre la dispersión de ondas durante su difracción, ya que dichos fenómenos sólo se producen en los ensayos transversales pero no sobre las medidas longitudinales. En consecuencia, para estas fisuras más profundas el modelo anterior ha sido modificado multiplicándolo por una función biparamétrica $f(z/\lambda B; m_1, m_2)$, que representa matemáticamente el efecto de la dispersión sobre el ratio de transmisión:

$$\left(\frac{t_0}{t_z}\right) = \left(\frac{B/\lambda}{\sqrt{(B/\lambda)^2 + 4 \cdot (z/\lambda)^2}}\right) \cdot \left(1 + m_1 \left(\frac{z}{\lambda B}\right)^{m_2}\right)^{-1} \quad (\text{Ec. 8})$$

Por lo tanto se pueden diferenciar dos ramas distintas en las curvas que constituyen el modelo propuesto para las mediciones que se efectúen con el aparato dotado de transductores DPC: la superior, para fisuras poco profundas donde la mayoría de las bajas frecuencias componentes de las ondas incidentes pueden ser transmitidas al otro lado de la grieta (buena recepción del pulso), y la rama inferior correspondiente a aquellas profundidades para las que la mayor parte de las ondas

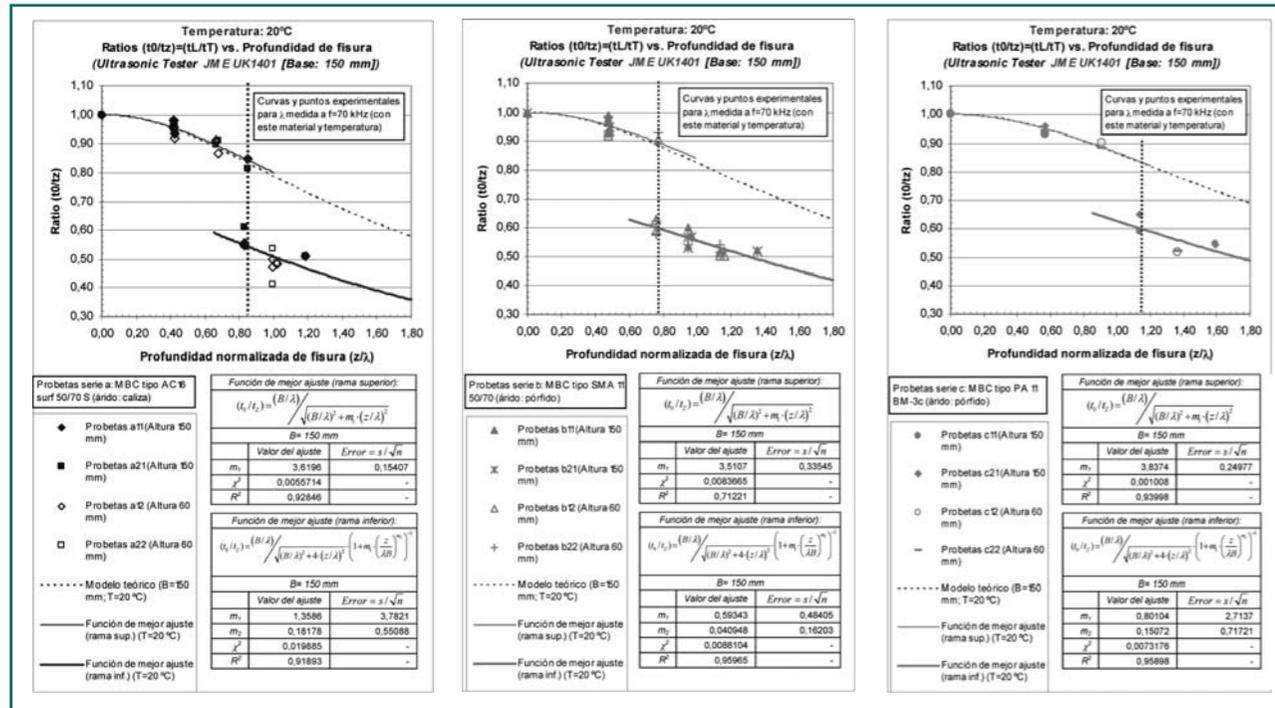


Figura 17.- Coeficientes de transmisión en función de la profundidad normalizada de fisura. Modelos de regresión para los tres materiales y comparación de los resultados experimentales con la aproximación teórica para T=20 °C (UK1401; transductores DPC; f=70 kHz; B=150 mm).

incidentes son reflejadas (amplitudes de señal mucho más reducidas). De acuerdo con nuestros resultados de laboratorio los valores críticos de (z/λ) han estado comprendidos entre 0,73 (para el AC16 S a 35 °C) y 1,1 (en el PA a 5 °C).

Por el contrario, al igual que lo observado con los tiempos de transmisión, se ha comprobado experi-

mentalmente que la atenuación del coeficiente de transmisión respecto del modelo teórico para las medidas efectuadas con el equipo de transductores convencionales (BP-5) se produce de forma progresiva al aumentar la profundidad normalizada, no experimentándose saltos en la función (al menos para z<70 mm, que constituye el límite de profundidades investigadas), como puede comprobarse en la Figura 18.

Por ello, el modelo expresado por la (Ec. 7) ha sido el empleado para su calibración con los resultados experimentales, puesto que además se trata del mismo tipo de función matemática que el modelo teórico original (significado físico) y presenta el mínimo número de parámetros de ajuste (máxima simplicidad). Los resultados indican que tampoco en este caso la técnica de autocalibración ha compensado los efectos de los fenómenos de dispersión, por la razón ya

apuntada de que éstos sólo se producen en las medidas transversales durante la difracción.

Sobre las propias gráficas se muestran los parámetros del mejor ajuste a ambas funciones matemáticas y su error estándar, así como los valores del Coeficiente de la Determinación (R²) y del estadístico χ², representativos de la bondad de dicho ajuste a los datos experimentales. R² ha resultado comprendido entre 0,7122 y

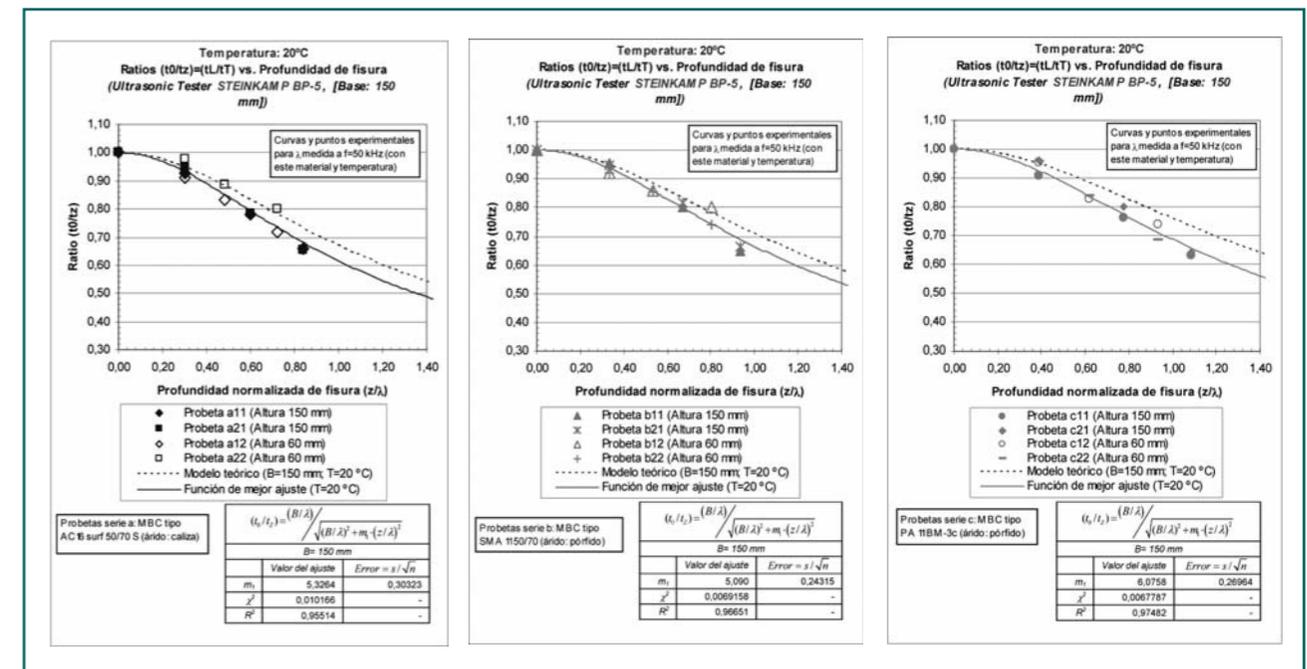


Figura 18.- Coeficientes de transmisión en función de la profundidad normalizada de fisura. Modelos de regresión para los tres materiales y comparación de los resultados experimentales con la aproximación teórica para T=20 °C (BP-5; transductores CPC; f=50 kHz; B=150 mm).

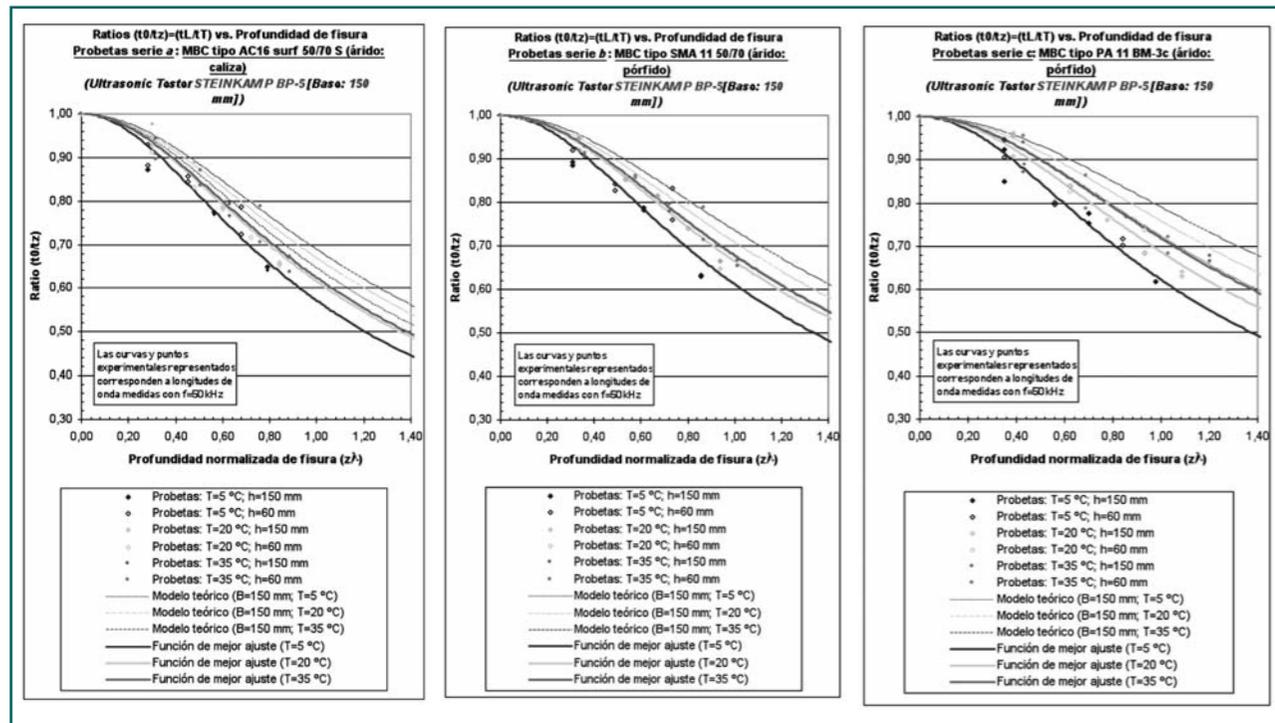


Figura 19.- Coeficientes de transmisión en función de la profundidad normalizada de fisura. Comparación de resultados a diferentes temperaturas (BP-5; transductores CPC; $f=50$ kHz; $B=150$ mm).

0,9799, para la rama superior, y entre 0,8812 y 0,9938 para la inferior en el caso de medidas obtenidas con el UK1401. Con el equipo BP-5 sus valores se encuentran entre 0,8971 y 0,9971. Dichas curvas, de las cuales en las figuras representadas se han incluido por brevedad solamente algunos de los casos estudiados, pueden ser considerados modelos de predicción de la profundidad de las grietas descendientes calibrados mediante ensayos de laboratorio.

La expresión de los **ratios de transmisión como función de la profundidad normalizada** ha permitido apreciar claramente la influencia de la temperatura (Fig. 19), debido a que ésta modifica la longitud de onda (λ) al alterar las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas (E , ρ , ν). Además, la variable (z/λ) también incluye intrínsecamente la influencia de la frecuencia de pulso, todos ellos factores influyentes en los fenómenos de dispersión elastodinámica.

4.2.2. Efecto del agua u otro material rellenando el interior de la fisura

Los resultados de laboratorio con ambos instrumentos de ultrasonidos parecen mostrar un aparente incremento del coeficiente de transmisión entre 2,8% y 3,2%, cuando la fisura se encuentra rellena de agua, y del 1% a 3% cuando ha sido rellena con arena saturada (las mediciones se han efectuado sólo sobre las mezclas tipo AC y SMA, con $z=50$ mm). No han sido observadas diferencias apreciables con la temperatura.

En todo caso, la dispersión de resultados ha sido bastante elevada en el conjunto de todas las campañas de ensayos efectuadas por lo que los test de hipótesis efectuados **no han permitido concluir que existan evidencias de tipo estadístico** que permitan afirmar que la presencia de tales rellenos en el interior de la grieta afecte de forma significativa a los ratios de propagación resultantes.

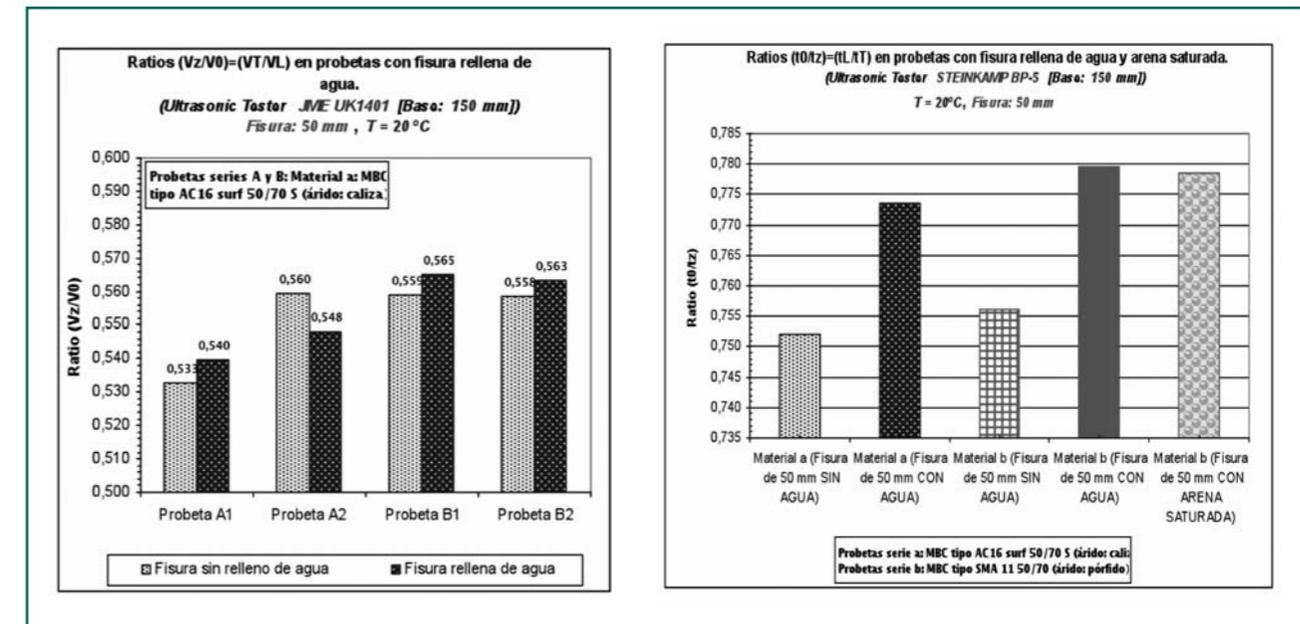


Figura 20.- Influencia de la presencia de agua y un relleno en el interior de la fisura en el coeficiente de transmisión. Promedios de los valores para $T=20$ °C y $B=150$ mm. a) UK1401; transductores DPC; $f=70$ kHz; b) BP-5; transductores CPC; $f=50$ kHz.

4.2.3. Influencia de la excentricidad de la posición de los transductores

Con los dos equipos de ultrasonidos se ha podido comprobar experimentalmente que si bien los ratios ($t_{excéntrico}/t_{eje}$) se aproximan al modelo deducido analíticamente, a partir de ciertos valores de la excentricidad se pueden llegar a incrementar de forma notable las diferencias (Fig. 21).

En el caso del UK1401 (DPC), mientras la excentricidad máxima sea inferior a 15 mm la relación ($t_{excéntrico}/t_{eje}$) no supera el 2% para AC16 S, el 3% para SMA 11 y el 4% para PA 11, con cualquier profundidad de fisura. Estos valores se traducen en una tasa diferencial máxima en el coeficiente de transmisión (t_o/t_z) del modelo propuesto con respecto al obtenido en posición simétrica de los sensores no mayor del 2,3%, 2,6% y 3,6%, respectivamente para dichos tres tipos de MBC. De forma

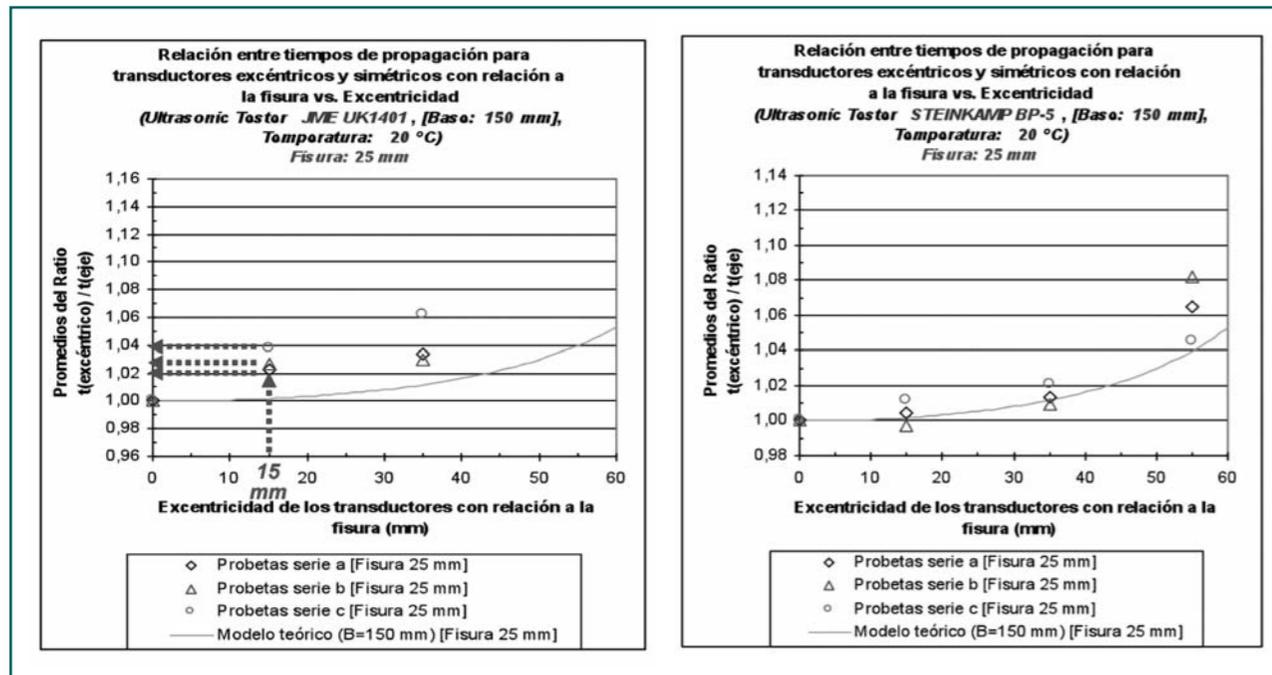


Figura 21.- Efecto de la excentricidad de la posición de los transductores con relación a la fisura en los tiempos de transmisión. Comparación de resultados experimentales con modelos teóricos. (Promedios del ratio $t_{excéntrico}/t_{eje}$ vs. excentricidad, para cada tipo de MBC a $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $z=25\text{ mm}$ y $B=150\text{ mm}$). a) UK1401; transductores DPC; $f=70\text{ kHz}$; b) BP-5; transductores CPC; $f=50\text{ kHz}$.

Temperatura=20 °C						
Profundidad de fisura, z (mm)	B=70 mm	B=80 mm	B=100 mm	B=120 mm	B=150 mm	B=200 mm
10	12 mm	16 mm	23 mm	31 mm	45 mm	70 mm
15	9 mm	12 mm	17 mm	23 mm	34 mm	55 mm
25	7 mm	9 mm	12 mm	16 mm	23 mm	38 mm
30	7 mm	8 mm	11 mm	14 mm	21 mm	33 mm
40	7 mm	8 mm	10 mm	13 mm	17 mm	27 mm
50	7,5 mm	8 mm	10 mm	12 mm	16 mm	24 mm
60	8 mm	9 mm	10 mm	12 mm	16 mm	22 mm
70	9 mm	9 mm	11 mm	12 mm	15 mm	21 mm

Tabla 8.- Excentricidades límite por debajo de las cuales no resulta necesario corregir las lecturas de tiempos de propagación (BP-5; $f=50\text{ kHz}$; $D=27\text{ mm}$).

similar, se ha calculado que las excentricidades máximas admisibles en la operación con el BP-5 (CPC) son las que se indican en la Tabla 8, de manera que dicha diferencia porcentual del ratio de transmisión no supere el 0,4%, 0,5% y 0,6%, respectivamente en esos mismos materiales.

5. Estudios y trabajos experimentales *in situ*

Con objeto de evaluar sobre firmes de carretera los modelos calibrados en laboratorio se realizaron cuatro campañas de ensayos con ultrasonidos *in situ* sobre pavimentos en servicio, acompañados de la extracción posterior de testigos de las fisuras para determinar la profundidad real y características de cada grieta. Esto ha permitido, además, comprobar los resultados obtenidos en los anteriores estudios de laboratorio y verificar el grado de ajuste, estimación de errores y repetibilidad de los modelos propuestos para la predic-



ción de la profundidad de fisuras descendentes en su aplicación práctica y sistemática como técnica de auscultación integrante de un sistema de gestión de firmes. Para ello, previamente fue necesario llevar a cabo otras cuatro campañas de inspección y evaluación visual de las fisuras sobre las carreteras investigadas, con registro de todos los datos (características de los firmes; identificación, clasificación y severidad de las fisuras) en fichas de inspección para cada tramo. De estos estudios, junto con la testificación efectuada, se ha obtenido una valiosa información consistente en **datos empíricos sobre el deterioro por TDC**.

Los trabajos in situ se han efectuado sobre los firmes de la red principal y de alta capacidad de carreteras de la isla de Gran Canaria (Canarias, España). Dado que el objetivo era la detección de fisuras iniciadas en superficie, se focalizó exclusivamente sobre los deterioros de tipo fisuración y sobre los firmes de las principales carreteras, ya que éstas presentan estructuras de mayor espesor, en muchos casos constituidas por firmes semirrígidos y soportan las mayores intensidades de tráfico pesado, los cuales se han demostrado como factores de influencia en la aparición y propagación de la fisuración descendente, de acuerdo con las investigaciones previas. Además resultaba interesante analizar, por primera vez en España, la posible afección de este modo de deterioro sobre los firmes bituminosos en climas como los de estas latitudes, con reducida pluviometría pero sometidos a una intensa acción de la radiación ultravioleta. Los firmes investigados suponen más de 250 km de calzadas, integran

el 92% de la longitud de vías insulares de alta capacidad y soportan el 65% del total del tráfico pesado de la red (algunos de dichos tramos han registrado $IMD=69600$ veh./día y $IMDp=4730$ veh. pesados/día, en 2008). Todos presentan estructuras de gran espesor (18 a 25 cm de MBC), tanto semiflexibles como semirrígidas (éstas últimas en un 20% de los tramos), diseñadas para categorías de tráfico pesado de T00 a T2.

5.1. Evaluación *in situ* de los modelos calibrados

Resulta preciso hacer notar que existen algunas diferencias en los materiales y condiciones de ensayo de los firmes respecto de las probetas de MBC tipo AC16 surf 50/70 S (árido calizo) fabricadas en laboratorio: en primer lugar, el material del firme presentaba una antigüedad media de 6 años (sin rehabilitaciones previas) por lo que acumulaba un cierto grado de envejecimiento que afecta a su módulo; la consistencia del betún también es más dura (B35/50 en el firme); la naturaleza mineralógica de los áridos es basáltica; los firmes no integran un material completamente homogéneo puesto que están constituido por tres capas diferentes (AC16 D [ó S] + AC22 S + AC32 G). También hay que considerar las lógicas diferencias de compactación entre las mezclas asfálticas puestas en obra y las probetas producidas en laboratorio. Las temperaturas a las que se han realizado los ensayos in situ, leídas sobre la superficie del pavimento, han estado comprendidas entre 18,5 °C y 21 °C. Las profundidades de grieta investigadas han variado entre 25 mm y 135

mm, lo que constituye un amplio rango de valores que posibilita su comparación con los resultados de laboratorio del material de similares características.

En las campañas de ensayos in situ se han investigado 17 fisuras diferentes, seleccionadas entre aquellas previamente identificadas en las campañas de inspección como susceptibles de ser de tipo TDC por sus características morfológicas y de ubicación. El procedimiento operativo con ultrasonidos ha sido similar al efectuado en laboratorio, en particular en lo referente a la calibración de los instrumentos, preparación y colocación del material de contacto acústico (en el caso de transductores CPC) y tamaño muestral de las mediciones. Con el equipo UK1401 (DPC) se efectuaron en total 220 medidas individuales en 14 ensayos, incluyendo las longitudinales y transversales a cada grieta del pavimento. Con el BP-5 (CPC) fueron registradas 672 medidas individuales en 27 ensayos con bases 200, 150 y 70 mm.

Las mediciones in situ con ambos instrumentos han resultado con mayor dispersión que los resultados de laboratorio, especialmente con el de transductores

convencionales de contacto plano, como puede comprobarse en la Tabla 9. Según dichos valores, se ha calculado que el tamaño muestral en cada posición de lectura en los trabajos in situ con este instrumento no debería ser inferior a diez ($n \geq 10$).

En la Figura 23 se muestran, sobre las curvas de los modelos calibrados en laboratorio, algunos de los resultados de los ensayos in situ, cuyas profundidades de fisura han sido directamente determinadas a partir de los testigos extraídos. Debido al nivel de severidad de las grietas auscultadas, el 84% de éstas han presentado profundidades excesivamente superiores a las recomendadas para la operación con ambos instrumentos de ultrasonidos ($z/\lambda < 0,5$, para BP-5 y $z/\lambda < 0,7$, con UK1401) con ese material y temperatura. Sin embargo, a pesar de ello y de las ya comentadas diferencias en las mezclas bituminosas y condiciones operativas, los resultados obtenidos in situ se ajustan adecuadamente a los modelos propuestos. Solamente tres de los ensayos in situ (PK 6+950 a 7+250; con BP-5 y B=150 mm) han proporcionado valores de ratios de transmisión excesivamente bajos en comparación con

	Ensayos in situ		Ensayos de laboratorio	
	St. Dev. (s)	Coef. Variación	St. Dev. (s)	Coef. Variación
UK1401 (DPC); f=70 kHz	2,8 μ s	3,31%	1,2 μ s	3,48%
BP-5 (CPC); f=50 kHz	3,3 μ s	3,25%	0,1 μ s	0,27%

Tabla 9.- Promedios de la desviación estándar y del coeficiente de variación muestrales en los ensayos in situ y de laboratorio sobre MBC tipo AC16.

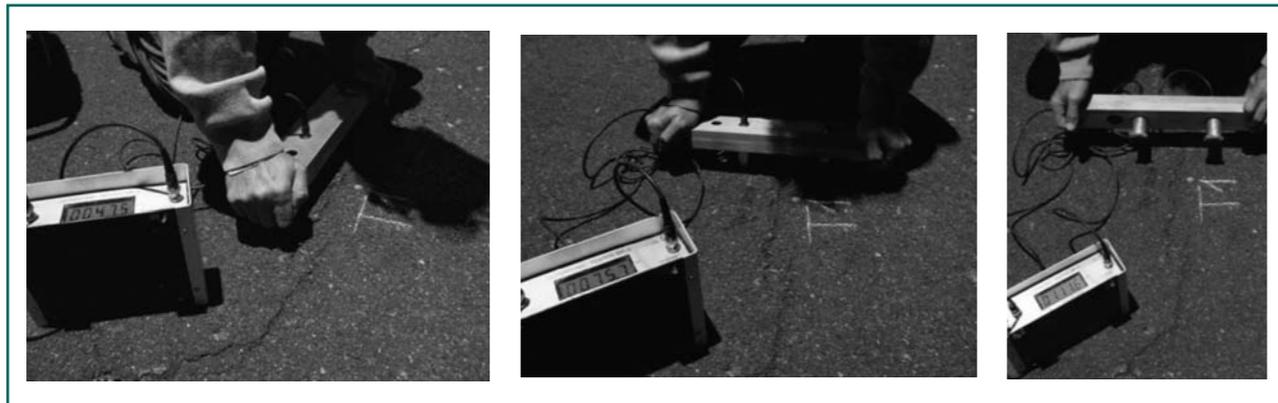


Figura 22.- Ejemplo de realización de medidas in situ en sentido longitudinal y transversal a la fisura con aparato de ultrasonidos BP-5.

la curva del modelo (un 27% inferiores en promedio). En éstos, al tratarse de la segunda campaña en campo, aún no se contaba con la experiencia suficiente en la aplicación de la técnica (no se operó con el separados de transductores), realizándose además las mediciones en difíciles condiciones de trabajo por las obras sobre el firme. Por tanto, dado que muy probablemente dichos puntos no son correctos, han sido excluidos del análisis probabilístico de los resultados in situ, el cual ha permitido estimar que un intervalo de confianza al 95% para el error medio que se cometería en la predicción de la profundidad de las grietas descendentes aplicando los modelos de laboratorio estaría comprendido entre el 5,4% y el 13% (ver Tabla 10), resultando bastante similares con ambos aparatos.

5.2. Características observadas de la TDC e impacto sobre los firmes estudiados

Un importante resultado de los estudios in situ ha sido la comprobación de que la totalidad de las fisuras de las cuales se ha obtenido testificación han resultado ser de tipo descendente (iniciadas en la superficie del pavimento y no reflejadas desde las capas inferiores más rígidas en muchos de estos firmes), con profundidades variables entre 25 y 135 mm y niveles de severidad de tipo bajo o moderado, al cabo de tiempos de vida en servicio entre 5 y 9 años. Parece por tanto que, según ya han apuntado otras investigaciones previas a lo largo de la última década (apartado 1.1), realmente este modo de fallo es uno de los mecanismos de deterioro que afectan de forma más frecuente a los firmes asfálticos de las características mencionadas, incluso

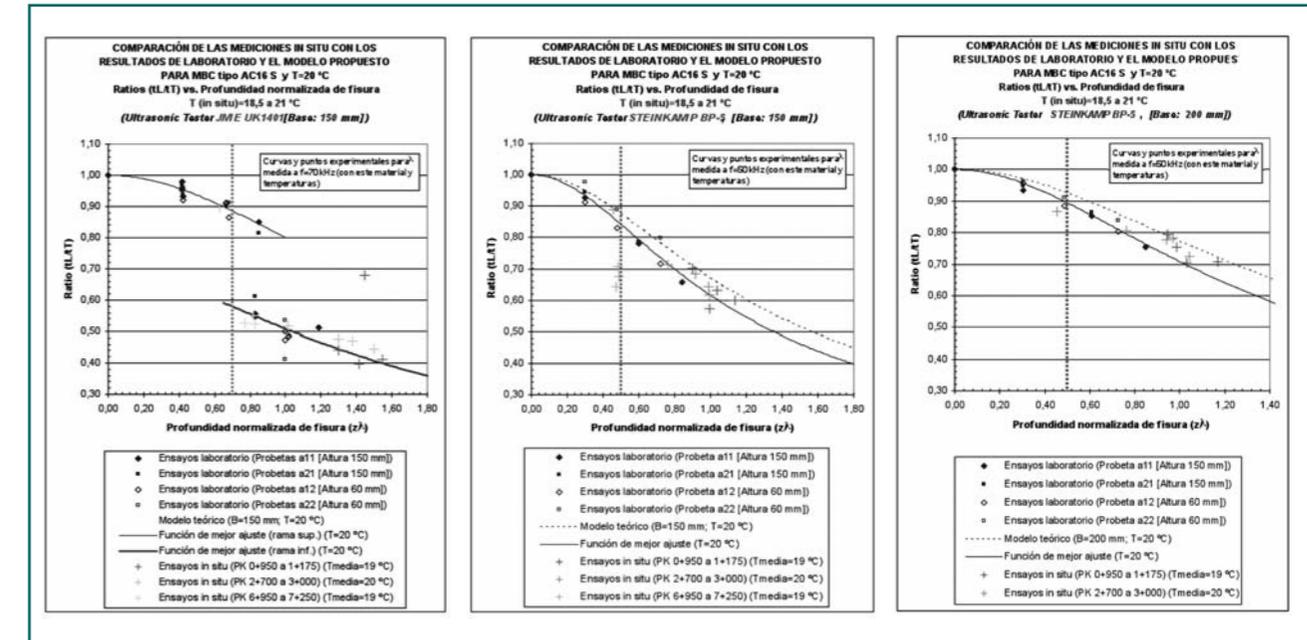


Figura 23.- Coeficientes de transmisión medidos en las campañas in situ y su comparación con los resultados de laboratorio y los modelos propuestos para MBC tipo AC16 S y T=20 °C. a) UK1401 (DPC), f=70 kHz; b y c) BP-5 (CPC), f=50 kHz, D=27 mm.

	Tamaño muestral, n	R ²	χ ²	Intervalo de confianza al 95% para el error medio (en valor absoluto) E predicción	
UK1401 (DPC); f=70 kHz	B=150 mm	14	0,9621	0,00066	5,4% - 12,5%
BP-5 (CPC); f=50 kHz	B=200 mm	10	0,8881	0,0246	6,5% - 13,0%
	B=150 mm	15	0,7281	0,1128	

Tabla 10.- Correlaciones entre los resultados de los ensayos in situ y el modelo propuesto para MBC tipo AC16 (T=20 °C) y estimación estadística de la incertidumbre en su aplicación para la predicción de la profundidad de las fisuras descendentes.

también en climas y zonas térmicas medias (si bien, en el caso de Canarias, sometidos a intensa acción de la radiación ultravioleta).

Resulta interesante destacar que, aunque las fisuras iniciadas en la superficie han sido registradas en numerosos casos sobre los bordes de las bandas de rodadura, también con frecuencia se han observado situadas exactamente en el interior de dichas bandas (al presentar una ligera deformación permanente o rodera). En estos últimos casos, las fisuras parecen estar asociadas a fenómenos de fatiga, con un aspecto superficial donde comienza a aparecer una superficie de finas grietas interconectadas en torno a la grieta longitu-

dinal principal. Por tanto, incluso las fisuras testificadas que presentaron un **patrón y aspecto externo típico de un mecanismo de fisuración por fatiga también han resultado de tipo TDC** (Fig. 24). En el caso mostrado en la Figura 24a, la aparición de la fisura descendente en el interior de la banda de rodadura (no en sus bordes) en la zona de frenado para el desvío hacia una parada de autobuses demuestra que en este caso ha sido provocada por la acción acumulada del tráfico pesado, habiéndose comprobado con ultrasonidos su iniciación en la superficie del firme. Este último resultado no ha sido hasta el momento destacado de forma explícita por las investigaciones previas que han analizado la TDC. Por esta razón, los mecanismos de

inicio y propagación de la fisuración por fatiga y los métodos de diseño de firmes, ampliamente aceptados, deberían ser revisados atendiendo a estas observaciones empíricas.

Con firmes de 6 años en servicio desde su construcción, la fisuración ha afectado a la capa de rodadura y en un 46,7% de los casos también a aproximadamente un quinto del espesor de la intermedia, lo que muestra un **avanzado crecimiento de la TDC en un período inferior a la tercera parte de su vida de diseño**. Los testigos extraídos sobre fisuras han permitido comprobar que, aunque en algunos casos la localización

del inicio de la fisuración sí parece estar asociada a la presencia de una segregación de la mezcla que constituye la capa de rodadura, en la mayoría de las muestras no parece ser el principal desencadenante, ya que más frecuentemente se ha observado su comienzo en zonas de la capa de rodadura con, aparentemente, alta homogeneidad. Por el contrario, los testigos han permitido comprobar que **el material en la zona de la fisura se encuentra altamente debilitado** y que, con estados avanzados en el nivel de severidad y profundidad de la fisuración, puede resultar difícil o en ocasiones incluso imposible, obtener testigos que permitan evaluar con precisión la profundidad de la fisura.

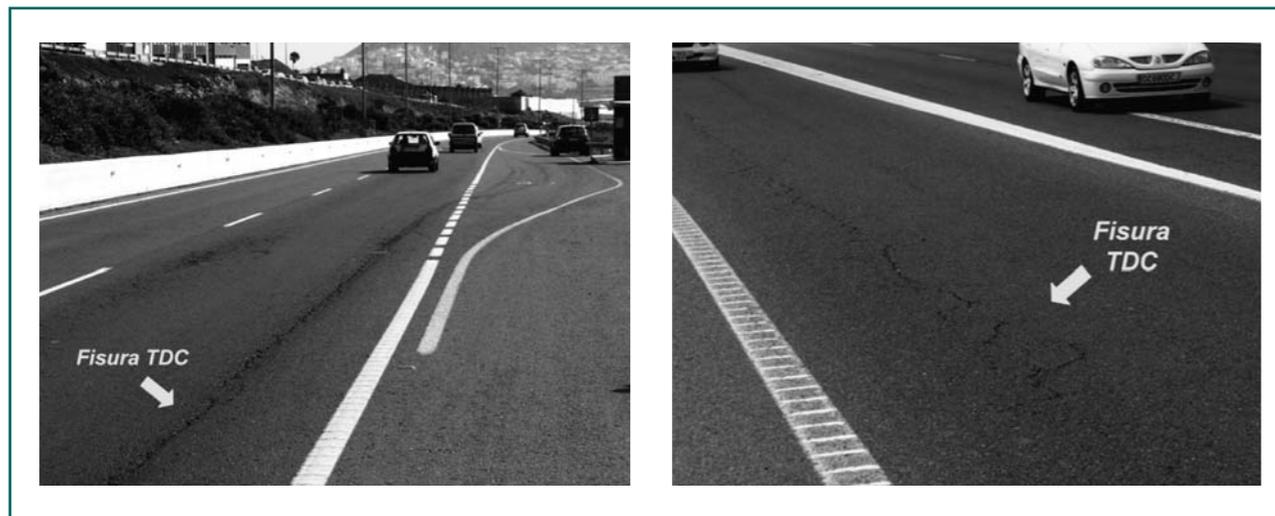


Figura 24.- Fisuras longitudinales en el interior de las bandas de rodadura con múltiples grietas interconectadas y aspecto de fisuración por fatiga. a) GC-2. PK 24+000; b) GC-1, Las Palmas de Gran Canaria, PK 5+500 (2009).

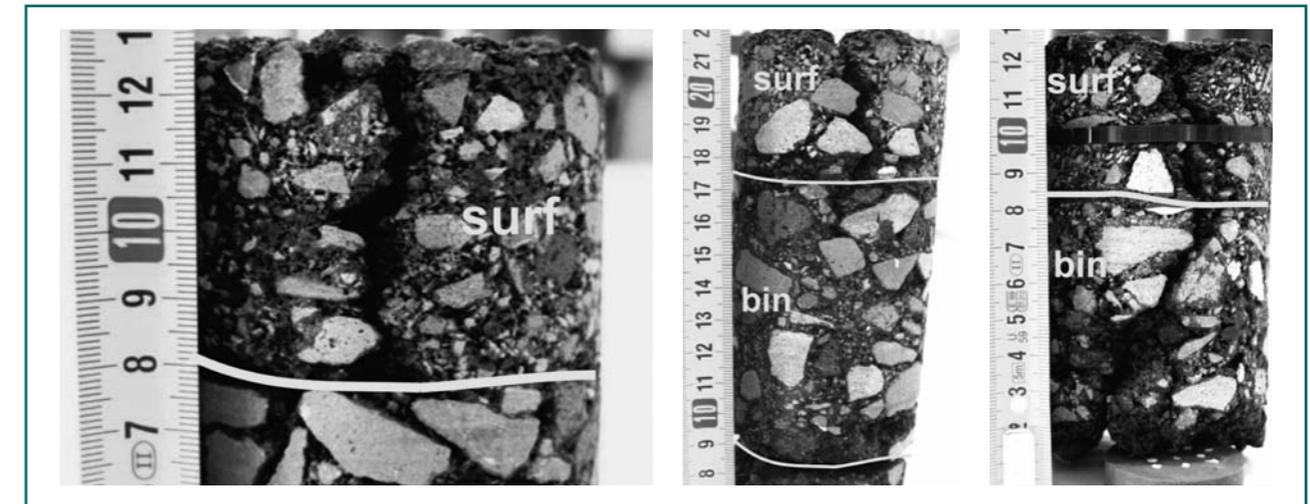


Figura 25.- Ejemplo de fisuras descendentes con diferentes profundidades y niveles de severidad. a) TDC en la capa de rodadura, nivel de severidad moderado; b) TDC afectando a la capa de rodadura y ligeramente a la intermedia, severidad baja; c) TDC afectando a la capa de rodadura y a la intermedia en prácticamente la totalidad de su espesor, severidad baja (GC-3, Las Palmas de Gran Canaria, 2010).

6. Relevancia de resultados y principales aportaciones

La importancia de la investigación y de los resultados obtenidos puede justificarse mediante dos aspectos principales:

- En primer lugar, porque los trabajos llevados a cabo han dado solución a algunas de las importantes dificultades de los actuales métodos para la determinación de la profundidad de las fisuras iniciadas en la superficie de un firme (como ya se puso de manifiesto en la introducción de este trabajo), mediante la utilización de una metodología no destructiva, de bajo coste, rápida, de fácil implementación e interpretación y capaz de ofrecer un elevado rendimiento sobre las mezclas asfálticas. Además ha resultado aplicable en un amplio rango de profundidades de fisura y ha permitido resolver los problemas de acoplamiento de los transductores ultrasónicos sobre las superficies tan características de estos materiales.
- Por otra parte, como conclusión de los resultados obtenidos se puede afirmar que la técnica propuesta puede emplearse con suficiente repetibilidad y fiabilidad sobre pavimentos asfálticos, con posibilidad de ser integrada entre las técnicas rutinarias de auscultación que formen parte de los Sistemas de Gestión de Firmes (PMS), siendo el procedimiento de ensayo desarrollado lo sufi-

cientemente completo (debido a los numerosos factores analizados empíricamente) como para poder considerarse susceptible de ser convertido en norma experimental.

Las principales aportaciones del estudio pueden sintetizarse en los tres tipos de resultados siguientes:

- La **deducción de modelos matemáticos iniciales**, aún siendo aproximados, constituye una de las más importantes contribuciones de esta investigación, ya que ha permitido interpretar adecuadamente los resultados empíricos y la obtención posterior de modelos más exactos que posibilitan la aplicación práctica de esta metodología NDT, no habiendo sido planteados hasta el momento por ninguna de las investigaciones previas. Las principales variables consideradas y los postulados de dichos modelos han sido presentados en el apartado 3.
- Con los resultados experimentales se han podido calibrar estas funciones analíticas previas. La influencia de las distintas condiciones experimentales investigadas (ya comentadas en el anterior apartado 4) se ha reflejado en los **modelos calibrados** que se proponen. Además, se han generado gráficos para su utilización rutinaria en la evaluación de las fisuras de firmes (para algunas condiciones de ensayo frecuentes en la práctica) y se han calculado sus expresiones matemáticas generalizadas para los tres tipos de materiales asfálticos estudiados (AC16 S, SMA 11 y PA 11), tres

temperaturas durante la auscultación (5, 20 y 35 °C), dos tipos de aparatos y transductores de ultrasonidos (UK1401 [DPC] y BP-5 [CPC]) y, para el segundo de estos instrumentos, seis diferentes bases de medida (B=70, 80, 100, 120, 150 y 200 mm). En la Figura 26 se presentan, por brevedad, solamente algunas de estas representaciones gráficas de los modelos propuestos (concretamente para la MBC tipo AC16 S, a 20 °C). Como puede observarse, se han calculado también los límites superior e inferior del intervalo de confianza al 95% para la predicción de la profundidad de la fisura con cada una de las curvas, así como las regiones y sus límites en las que se recomienda la aplicación de cada modelo y aquéllas otras con posibles restricciones (sombreado amarillo) o donde no está recomendado su empleo (sombreado rojo) por los mayores errores en dicha predicción, de acuerdo con los estudios teóricos y las experiencias de laboratorio e in situ.

- Por último, y a modo de síntesis de la investigación realizada, se han propuesto las necesarias **recomendaciones para la aplicación a firmes en servicio** de esta metodología con diferentes tipos de instrumental, así como las condiciones de trabajo que resulta preciso tener en cuenta para el uso de los modelos de predicción, las cuales se resumen en el apartado siguiente.

7. Recomendaciones para la aplicación práctica de la técnica propuesta

Los trabajos teóricos y experimentales realizados han permitido demostrar que resulta preciso elegir correctamente y establecer ciertos límites sobre determinados parámetros que influyen en los resultados de las mediciones. Los principales aspectos a considerar para la aplicación de la técnica de ensayo se enumeran a continuación:

- 1) *Tipología de transductores:* La investigación empírica ha verificado que tanto los sensores tipo DPC como los CPC son aplicables sobre las superficies rugosas, irregulares y con múltiples poros de las mezclas bituminosas. Los primeros presentan la ventaja de no requerir el empleo de ningún medio adicional que mejore la impedancia acústica que ejerce el aire interpuesto. Para los segundos se ha demostrado que el empleo de láminas de masilla plástica de entre 3 y 4 mm de espesor garantiza una rápida operación y perfecta adaptación sobre este tipo de superficies, requiriendo una presión de contacto moderada, siendo reutilizable y manteniendo la limpieza y rapidez de ejecución del procedimiento de ensayo. También se ha verificado que el empleo de un soporte para los transductores resulta esencial para limitar la

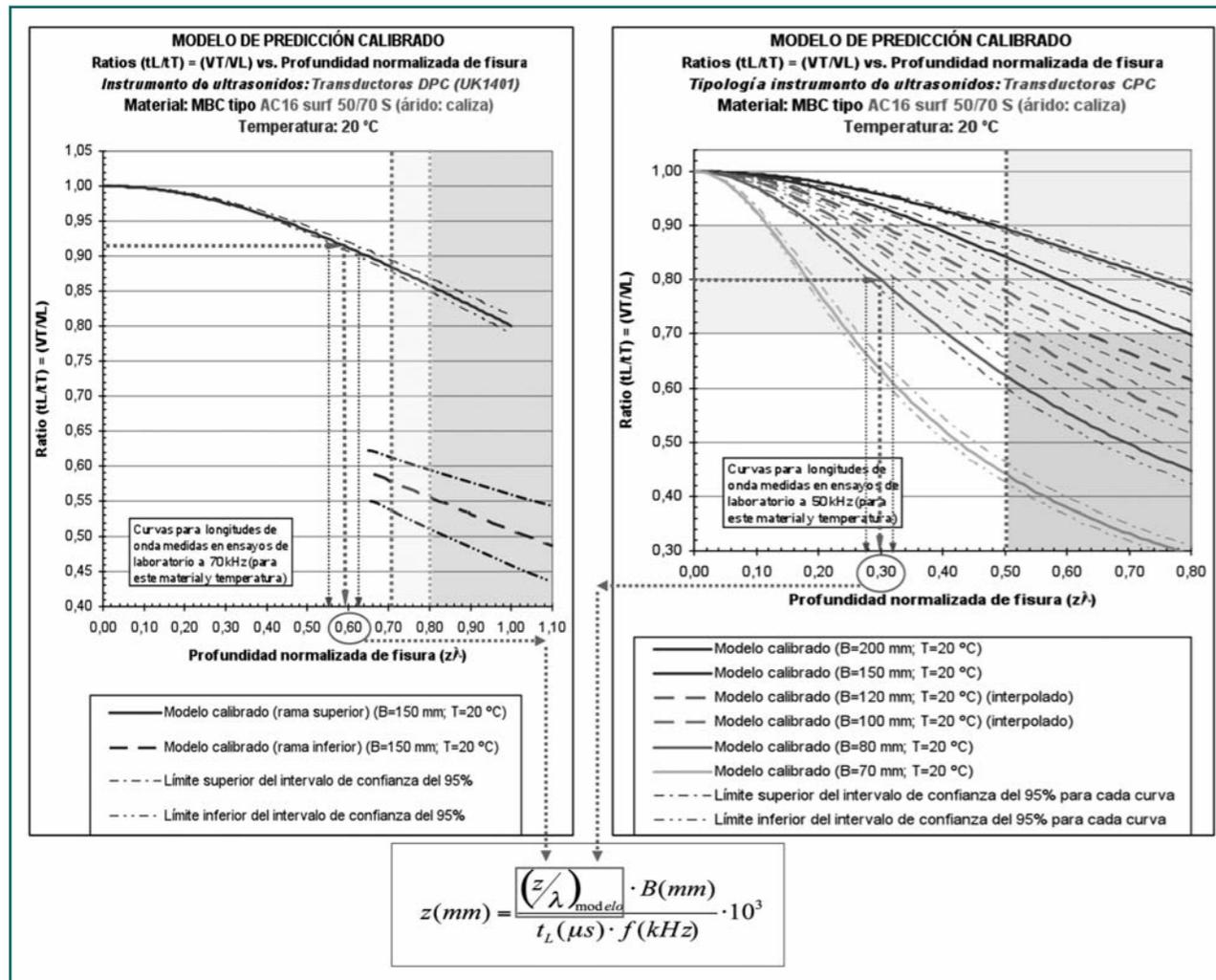


Figura 26.- Ejemplos de representación gráfica del modelo calibrado propuesto para la predicción de la profundidad de TDC en las aplicaciones prácticas sobre firmes en servicio para MBC tipo AC16 surf 50/70 S y temperatura 20 °C.

a) Modelo para UK1401, transductores DPC; b) Modelo para BP-5, transductores CPC.

desviación estadística de los resultados y su ajuste a los modelos propuestos.

Respecto de la aplicabilidad de cada tipo de equipo y transductores, en general puede decirse que en los tres tipos de MBC estudiadas, el instrumento BP-5 (CPC, $f=50$ kHz) ha permitido obtener mediciones hasta profundidades relativas casi el doble que con el UK1401 de base fija y transductores DPC ($f=70$ kHz), para un determinado nivel de error. Esto indica que la base de medida fija de 150 mm que incorpora este segundo aparato puede resultar adecuada para fisuras que no superen entre 30 y 45 mm (dependiendo del tipo de material) pero no resulta suficiente para grietas más profundas. Además las experiencias con este instrumento han demostrado que, para valores de profundidades normalizadas de fisura (z/λ) por encima de 0,73 a 1,14 (según tipo de MBC y temperatura), las señales de ultrasonidos experimentan una muy importante atenuación. El promedio de la desviación estadística de las mediciones con el aparato de transductores de contacto seco también ha resultado ser, en el conjunto de todas las campañas de laboratorio e in situ, un 38% superior a la media de la dispersión de resultados con el de sensores CPC. Con respecto al resto de variables estudiadas en la investigación experimental de laboratorio puede decirse que con ambos instrumentos de ultrasonidos han sido observados los mismos efectos en todos los casos. De igual modo, los errores

en la estimación de (z) al aplicar los modelos propuestos a los ensayos de comprobación in situ han resultado en promedio muy similares para los dos equipos (Tabla 10 anterior).

2) *Frecuencia de excitación*: Dicha frecuencia está relacionada con la longitud de onda necesaria, la velocidad de propagación en cada material (considerando las posibles temperaturas de trabajo) y el tamaño de la fisura a auscultar. En general cuanto mayor sea la temperatura, la discontinuidad granulométrica de la mezcla bituminosa, la profundidad de las fisuras y más blanda la consistencia del ligante (menos módulo), menor será la frecuencia de trabajo a utilizar. Normalmente con mezclas bituminosas no deben emplearse frecuencias mayores de 100 kHz debido a los fenómenos de dispersión elastodinámica. Además, resulta preciso limitar la relación máxima operacional entre la profundidad de fisura y la longitud de onda (z/λ) para cada tipo de instrumento, material asfáltico y temperatura con el fin de reducir en lo posible la aparición sistemática de resultados anómalos, su desviación estadística y los efectos de los fenómenos de dispersión de las ondas en la atenuación del pulso. Dichos valores máximos de (z/λ) que se recomienda no sean superados se encuentran entre 0,4 (para SMA11 con BP-5) y 0,7 (para AC16 S con UK1401).

3) *Base de medida (separación entre transductores)*: Su elección ha de hacerse dependiendo de la

profundidad de las fisuras que se prevé auscultar. Deberá limitarse también la profundidad relativa de fisura (z/B) máxima de trabajo con cada tipo de instrumento de ultrasonidos, frecuencia de pulso y material. Estos límites vienen fundamentalmente dados por razones operativas similares a las comentadas en el párrafo anterior, además de que para acotar los errores de predicción de los modelos propuestos debe asegurarse una proporcionalidad entre la profundidad de las grietas y la base de medida utilizada. Por otro lado, ha de tenerse en cuenta que la separación entre transductores no debe ser tampoco excesivamente reducida para evitar los efectos de amplificación de la señal recibida por los fenómenos de interacción en el campo de dispersión cercano a la fisura. Según los estudios experimentales (z/B) no debería superar valores comprendidos entre 0,2 (para SMA 11 y PA 11, con UK1401) y 0,35 (para BP-5 con cualquier material).

4) *Diámetro de los transductores:* En el caso de transductores tipo CPC, su diámetro (D) deberá elegirse en relación con la base de medida empleada y, por tanto, con la profundidad de las fisuras, reduciéndose dicho diámetro a medida que la separación entre transductores sea menor y aumente la profundidad de las grietas. Los diámetros grandes pueden producir errores importantes en el modo de medición con transmisión indirecta cuando la relación (z/B) es

elevada por lo que se recomienda que no sea mayor de 30 mm. Además, pueden producirse efectos de fluctuación y atenuaciones de las amplitudes en el campo cercano próximo a cada transductor, dependiendo del diámetro de éstos, de la frecuencia del pulso y de la velocidad del medio de propagación. Por ello, ha de limitarse el diámetro relativo (D/B) en función de dicha profundidad relativa de fisura, según se especificó en la Tabla 4.

5) *Tipo de mezcla asfáltica en caliente:* Aunque las experiencias se han llevado a cabo sobre mezclas bituminosas en caliente tipo AC, SMA y PA, por lo general el procedimiento operativo también resulta válido para otros tipos de mezclas asfálticas, si bien los modelos deberán entonces ser calibrados previamente de forma específica si se desean utilizar con materiales diferentes (o bien, de forma aproximada, mediante interpolación de los parámetros de ajuste obtenidos para esos tres tipos de materiales).

6) *Temperatura del material:* El efecto de la temperatura queda recogido en los modelos propuestos al haber sido expresado éstos en función de (z/λ). De esta manera la temperatura, al modificar las propiedades mecánicas de los materiales bituminosos, influye sobre la velocidad de propagación de las ondas y, en consecuencia, modifica la longitud de onda (para una misma frecuencia de pulso).

7) *Posición de los transductores con relación a la fisura:* Para las medidas transversales los transductores han de colocarse lo más simétricamente posible con relación a la grieta, ya que su posible excentricidad puede tener importante influencia en los resultados de las mediciones dependiendo del tipo de aparato, sensores, base de medida adoptada y profundidad de la fisura, como se demostró en el apartado 4.2.3.

8) *Otros factores:* Además de los anteriores, la investigación ha demostrado que son también factores influyentes sobre los resultados la *presencia de capas* del firme *despegadas* y las *características superficiales (macrotextura)* de la mezcla bituminosa, variables que han quedado reflejadas en los modelos calibrados obtenidos. Se ha comprobado, sin embargo, la independencia de los resultados respecto del *espesor de la sección asfáltica* por debajo de la fisura, pero no han podido ser concluyentes, desde un punto de vista estadístico, los resultados en relación a la posible influencia de la saturación del material en las grietas.

8. Conclusiones

De forma general es posible concluir que la determinación no destructiva de la profundidad de las fisuras superficiales de un pavimento presenta una importante complejidad. De hecho algunas de las técnicas NDT empleadas habitualmente para la evaluación de firmes, como las basadas en las medidas de deflexiones, el geo-radar o el vídeo-láser, no permiten la medición precisa de la profundidad de las grietas ni la identificación de las capas afectadas por la fisuración, como ya han puesto de manifiesto algunas investigaciones previas.

El empleo en este estudio de metodologías basadas en la transmisión de ondas elásticas ultrasónicas ha posibilitado establecer un procedimiento para la identificación de las fisuras de tipo descendente ("*top-down cracking*"), que permite tanto diferenciarlas inequívocamente de las que afectan al espesor asfáltico completo del firme como determinar la profundidad de estas grietas abiertas en la superficie del pavimento. La técnica propuesta resuelve numerosos problemas que suele presentar la aplicación de métodos sísmicos sobre materiales multifase con estructura interna heterogénea, como los debidos a los fenómenos de dispersión, atenuación y cambios de fase de las ondas, los cuales son además dependientes de la frecuencia en el caso de materiales de naturaleza viscoelástica. También han tenido que solventarse las dificultades relacionadas con el acoplamiento entre los transductores y la superficie rugosa, muy irregular y con múltiples poros de las mezclas bituminosas,

empleando para ello transductores piezoeléctricos de tipo DPC (contacto puntual seco) y de tipo CPC (contacto plano a través de un medio de acoplamiento), mediante la utilización, en este último caso, de un material especialmente seleccionado para mejorar la impedancia acústica. Para ello ha resultado preciso realizar una amplia y detallada investigación para la determinación del procedimiento de ensayo más adecuado, analizando todas las variables involucradas en el proceso (características de las ondas, propiedades del material, variables ambientales, aspectos geométricos, características de los equipos y sensores, etc.).

La metodología empleada, basada en la utilización de una técnica de autocalibración consistente en la realización de varias mediciones de tiempos o velocidades de propagación de ondas ultrasónicas transitorias, de manera que pueda obtenerse el coeficiente de transmisión de la señal mediante ensayos paralelos y transversales a la fisura, puede ser aplicada con suficiente repetibilidad y fiabilidad a las mezclas bituminosas de pavimentación. Así, los promedios del coeficiente de variación en el conjunto de todas las campañas de laboratorio e in situ han resultado 1,55% y 3,28%, respectivamente. El máximo error relativo promedio en la estimación de la profundidad de fisura al aplicar los modelos que se proponen no ha superado el 13%, con un nivel de confianza del 95%, en el conjunto de todos los ensayos in situ realizados.

Este método de auscultación y los modelos calibrados pueden emplearse con instrumentos de ultrasonidos

dotados con transductores de tipo DPC y CPC en ensayos efectuados sobre una única superficie accesible del material, no precisando estas superficies preparación previa alguna. Además, las medidas resultan independientes del espesor total del firme e incluso del espesor de materiales asfálticos por debajo del vértice inferior de la grieta. Tampoco se ven afectadas por su abertura ni por la forma de su punta.

La experiencia obtenida tanto en laboratorio como especialmente in situ posibilita la aplicación de esta técnica no destructiva en la evaluación práctica rutinaria de los deterioros de los firmes con posibilidad de ser integrada entre las metodologías de auscultación para la gestión de su conservación. Así, su empleo permitiría la reducción del número de testigos requeridos para el control de los deterioros de tipo fisuración, e incluso la monitorización de su velocidad de avance mediante mediciones periódicas, proporcionando un método sencillo, rápido de operar, económico y objetivo para una evaluación más uniforme de la profundidad y extensión de las fisuras iniciadas en la superficie del pavimento.

Agradecimientos

Esta investigación ha resultado posible gracias a la financiación del Ministerio de Ciencia e Innovación del Proyecto *FÉNIX: Investigación Estratégica en Carreteras más Seguras y Sostenibles: Subprograma Investigación en Firmes de Larga Duración* (Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial [CDTI]; Programa CENIT [Consortios Estratégicos Nacionales en Investigación Técnica]; convocatoria de abril de 2007; clave: P07-0430-1092) en el que la UPM y la ULPGC han participado, conjuntamente con diferentes socios industriales, dentro de la *A.I.E. Proyecto Fénix*, permitiendo la realización de una *Tesis Doctoral* en el Laboratorio de Caminos del Departamento de Ingeniería Civil-Transportes de la UPM (Fransesqui, 2011).

Los estudios y trabajos de investigación sobre firmes de carreteras en servicio han podido realizarse gracias a la colaboración del Servicio de Obras Públicas e Infraestructuras de la Consejería de Obras Públicas, Infraestructuras y Aguas del Cabildo Insular de Gran Canaria, los cuales han permitido contrastar los modelos obtenidos en laboratorio.

Referencias Bibliográficas

- (1) Achenbach, J.D.; Gautesen, A.K.; Mendelsohn, D.A. (1980). "Ray analysis of surface-wave interaction with an edge crack". *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*. SU-27, N° 3, p. 124-129.
- (2) Achenbach, J.D.; Komsky, I.N.; Lee, Y.C.; Angel, Y.C. (1992). "Self calibrating ultrasonic technique for crack depth measurement". *Journal of Nondestructive Evaluation*. Vol. 11, N° 2, p. 103-108.
- (3) Advanced Asphalt Technologies (AAT), LLC. (2004). *Top-Down Fatigue Cracking of Hot-Mix Asphalt layers. NCHRP Research 1-42 Report*. Washington D.C.: Transportation Research Board, National Research Council.
- (4) Applied Research Associates (ARA), Inc.; ERES Consultants Division (2004). *Guide for Mechanistic-Empirical design of new and rehabilitated pavement structures. NCHRP Research 1-37A Report*. Washington D.C.: Transportation Research Board, National Research Council.
- (5) Applied Research Associates (ARA), Inc. (2007) *Interim Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide Manual of Practice. NCHRP Research Project 1-40B*. Washington D.C.: Transportation Research Board, National Research Council.
- (6) Baladi, G.Y.; Schorsh, M.; Svasdisant, T. (2003). *Determining the causes of top-down cracks in bituminous pavements. Report N° MDOT-PRCE-MSU-2003-110. Final report*. East Lansing, Michigan: Pavement Research Centre of Excellence, Michigan Department of Transportation & Michigan Asphalt Paving Association. 255 p.
- (7) Birgisson, B.; Roque, R.; Sangpetngam, B.; Zhang, Z. (2002) "Hot Mix Asphalt fracture mechanics: a fundamental crack growth law for asphalt mixtures". *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. Vol. 71.
- (8) Colagrande, S.; Tallini, M.; Ranalli, D.; Scozzafava, M. (2007). Degradation of road pavements built in cutting sections evaluated with GPR. En: *4th International SIIV Congress*. Palermo, Italy: Società Italiana Infrastrutture Viarie, Sep. 2007.
- (9) Croll, J.G.A. (2009). "Possible role of thermal ratchetting in alligator cracking of asphalt pavements". *International Journal of Pavement Engineering*. Vol. 10, N° 6, p. 447-453.
- (10) European Commission (1997). COST 324. *Long Term Performance of Road Pavements. Final Report of the Action*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. 170 p. ISBN: 92-828-0308-2.
- (11) European Commission (1999). *Action COST 333: Development of New Bituminous Pavement Design Method. Final Report*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. 375 p. ISBN: 92-828-6796-X.
- (12) Franesqui, M.A. (2011). *Evaluación de la profundidad de la fisuración superficial descendente en pavimentos asfálticos mediante técnicas de ultrasonidos. Validación teórico-práctica y modelos*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. ISBN: 978-84-694-4893-9. 353 p.
- (13) Franesqui, M.A.; Gallego, J.; del Val, M.A. (2011). Top-Down Cracking depth monitoring using non-destructive ultrasonic testing in perpetual asphalt pavements. En: *5th International Conference on Bituminous Mixtures and Pavements*. Thessaloniki, Greece: Aristotle University of Thessaloniki, TRB & FAA, Jun. 2011.
- (14) Freitas, E.; Pereira, P.; Picado-Santos, L. (2002). Assessment of Top-Down Cracking causes in asphalt pavements. En: *2º Congresso Rodoviário Português*. Lisboa: Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Nov. 2002.
- (15) Fugro-BRE, Inc. (2001). *Key findings from LTPP Distress Data. Publication N° FHWA-RD-02-031. LTPP Techbrief*. Washington D.C.: Federal Highway Administration (FHWA), US Department of Transportation. 4 p.
- (16) Harmelink, D.; Aschenbrener, T. (2003). *Extent of top-down cracking in Colorado. Report N° CDOT-DTD-R-2003-7. Final report*. Denver: Colorado Department of Transportation. 53 p.
- (17) Hauwaert, A.V.; Thimus, J.F.; Delannay, F. (1998). "Use of ultrasonics to follow crack growth". *Ultrasonics*. Vol. 36, p. 209-217.
- (18) Hugo, F.; de Vos, E.; Tayob, H.; Kannemeyer, L.; Partl, M. (2008). Innovative applications of the MLS10 for developing pavement design systems. En: *3rd International Conference on Accelerated Pavement Testing*. Madrid: CEDEX, Oct. 2008.
- (19) In, C.W.; Kim, J.Y.; Kurtis, K.E.; Jacobs, L.J. (2009). "Characterization of ultrasonic Rayleigh surface waves in asphaltic concrete". *NDT&E International*. Vol. 42, p. 610-617.
- (20) Jacobs, M.; Hopman, P.; Molenaar, A. (1996). "Application of fracture mechanics principles to analyze cracking in asphalt concrete". *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. Vol. 65, p.1-39.
- (21) Kee, S; Zhu, J. (2010). "Using air-coupled sensors to determine the depth of a surface-breaking crack in concrete". *Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 127, N° 3, p. 1279-1287.
- (22) Khazanovich, L.; Velasquez, R.; Nesvijski, E.G. (2005). "Evaluation of top-down cracks in asphalt pavements by using a self-calibrating ultrasonic technique". TRB, National Research Council. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. N° 140, p. 63-68.
- (23) Kim, Y.; Lee, H; Little, D. (1997). "Fatigue characterization of asphalt concrete using viscoelasticity and Continuum Damage Theory". *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. Vol. 66, p. 520-569.
- (24) Matsuno, S.; Nishizawa, T. (1984). Longitudinal surface cracking of flexible pavement. En: *Proceedings of the Paving in Cold Areas Mini-Workshop*. Canada/Japan Science Technology Consultation, Vol. 2, p. 779-796.
- (25) Mendelsohn, D.A.; Achenbach, J.D.; Keer, L.M.; (1980). "Scattering of elastic waves by a surface-breaking crack". *Wave Motion*. Vol. 2, N° 3, p. 277-292.
- (26) Ministerio de Fomento, España. Dirección General de Carreteras (2008). *Orden Circular 24/2008 sobre el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3): Artículos 542-Mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso y 543-Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas*. O.C. 24/2008. Madrid: 2008.
- (27) Moore, W.M.; Hanson, D.I.; Hall, (Jr.)J.W (1978). *An introduction to nondestructive structural evaluation of pavements. Transportation Research Circular 189*. Washington, D.C.: Transportation Research Board (TRB), National Research Council. 33 p.
- (28) Myers, L.A.; Roque, R.; Ruth, B.E. (1998). Mechanisms of surface-initiated longitudinal wheel path cracks in high-type bituminous pavements. En: *Proceedings of*

- the Association of Asphalt Paving Technologists. Association of Asphalt Paving Technologists (APA), Vol. 67.
- (29) Nazarian, S.; Baker, M.R.; Crain, K. (1993). *Development and testing of a Seismic Pavement Analyzer. Report SHRP-H-375*. Washington, D.C.: Strategic Highway Research Program, National Research Council.
- (30) Nesnas, K.; Nunn, M.E. (2006). A thermal pavement response model for top-down reflection cracking in composite pavements. En: *Proceedings of the 85th TRB Annual Meeting*. Washington, DC: Transportation Research Board, Jan. 2006, 13 p.
- (31) Nesvijski, E. (2003). "Dry Point Contact transducers: design for new applications". *NDT.net* [en línea]. Vol. 9, Nº 9. [Consulta: 15 junio 2010].
<<http://www.ndt.net/article/v08n09/nesvi/nesvi.htm>>.
- (32) Newcomb, D.E.; Buncher, M.; Huddleston, I.J. (2001). Concepts of Perpetual Pavements. En: *Perpetual Bituminous Pavements. Transportation Research Circular Nº 503*. Washington, D.C.: Transportation Research Board (TRB), National Research Council.
- (33) Popovics, J.S., Song, W.; Achenbach, J.D. (1998). A study of surface wave attenuation measurement for application to pavement characterization. En: Medlock, R.D. & Laffey, D.C. (ed.). *Proceedings of Structural Materials Technology III: An NDT Conference* (SPIE). Vol. 3400, p. 300-308.
- (34) Popovics, J.S.; Song, W.S.; Ghandehari, M.; Subramaniam, K.; Achenbach, J.D.; Shah, S.P. (2000). "Application of surface wave transmission measurements for crack depth determination in concrete". *ACI Materials Journal*. Vol. 97, Nº 2, p. 127-135.
- (35) Roque, R.; Zhang, Z.; Sankar, B. (1999). "Determination of crack growth rate parameters of asphalt mixtures using the SuperPave Indirect Tension Test (IDT)". *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. Vol. 68, p. 404-433.
- (36) Rose, J.L.; Pilarski, A.; Balasubramaniam, K.; Dale, J.; Diprimeo, D. (1987). Wave scattering and guided wave considerations in anisotropic media. En: *14th Annual Review of Progress in Quantitative NDE*. Williamsburg, Va. Jun. 1987.
- (37) Rose, J.L.; Pilarski, A. (1988). "Surface and plate waves in layered structures". *Materials Evaluation*. Vol. 46. p. 596-605.
- (38) Sangpetngam, B.; Birgisson, B.; Roque, R. (2003). Development of an efficient Hot Mix Asphalt fracture mechanics-based crack growth simulator [CD-ROM]. En: *2003 TRB Annual Meeting*. Washington D.C.: Transportation Research Board, Jun. 2003.
- (39) Smith, R.; Lytton, R. (1985). Operating characteristics and user satisfaction of commercially available NDT equipment. En: *Transportation Research Record Nº 1007*. Washington, D.C.: TRB, National Research Council. p. 1-10
- (40) Tertre, A.; Cascante, G.; Tighe, S.L. (2010). Combining PFW and surface wave measurements for evaluation of longitudinal joints in asphalt pavements. En: *2010 TRB Annual Meeting*. Washington, D.C.: Transportation Research Board, Jan. 2010.
- (41) Timm, D.H.; Newcomb, D.E. (2006). "Perpetual Pavement design for flexible pavements in US". *International Journal of Pavement Engineering*. Vol. 7, Nº. 2, p. 111-119.
- (42) Uhlmeyer, J.S., Willoughby, K., Pierce, L.M., Mahoney, J.P. (2000). "Top-down cracking in Washington State asphalt concrete wearing course". *Transportation Research Record*. Washington, D.C.: TRB, National Research Council. Nº 1730, p. 110-1730.
- (43) University of Florida (2008). *Models for predicting Top-Down Cracking of Hot-Mix Asphalt layers. NCHRP Research 1-42A Report*. Washington D.C.: Transportation Research Board, National Research Council.
- (44) Wang, Y.; Mahboub, K.; Hancher, D. (2005). "Survival analysis of fatigue cracking for flexible pavements based on Long-Term Pavement Performance data". *Journal of Transportation Engineering (ASCE)*. Vol. 131, Nº 8, p. 608-616.
- (45) Wimsatt, A.J.; Scullion, T.; Fernando, E.; Hurlebaus, S.; Lytton, R.; Zollinger, D.; Walker, R. (2009). *A plan for developing high-speed, Nondestructive Testing procedures for both design evaluation and construction inspection. SHRP 2 Report S2-R06-RW*. Washington, D.C.: Transportation Research Board (TRB), National Research Council. 114 p.
- (46) Witczak, M.W.; El-Basyouny, M.M. (2004). Calibration of fatigue cracking models for flexible pavements En: *Guide for Mechanistic-Empirical Design. Appendix IT-1*. Washington, D.C.: National Cooperative Highway Research Program.
- (47) Wu, T.T.; Fang, J.S.; Liu, P.L. (1995). "Detection of the depth of a surface-breaking crack using transient elastic waves". *Journal of the Acoustic Society of America*. Vol. 97, Nº 3, p. 1678-1686.
- (48) Wu, T.T. (1999). Elastic wave propagation and nondestructive evaluation of materials. En: *Proceedings of the National Scientific Council*. Taiwan: R.O.C. Vol. 23, Nº 6, p. 703-715.
- (49) Zhang, Z.; Roque, R.; Birgisson, B.; Sangpetngam B. (2001). "Identification and verification of a suitable crack growth law (with discussion)". *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. Vol. 70, p. 206-241.
- (50) Zhang, Z.; Roque, R.; Birgisson, B. (2001). Evaluation of laboratory measured crack growth rate for asphalt mixtures. *Transportation Research Record*. Washington, D.C.: TRB, National Research Council. Nº 767, p. 67-75.