

Estudio de la sensibilidad del Ground Penetrating Radar al contenido en huecos de las mezclas bituminosas en pavimentos de carreteras

Study of Ground Penetrating Radar sensitivity to asphalt mixtures void content in road pavements

INFORMACIÓN DEL ARTICULO

Pedret Rodés J.1 y Pérez Gracia V.2

**1,2Universidad Politécnica de Cataluña, España
josep.pedret@upc.edu, phone: 34-934017271**

Historial del artículo:

Recibido
04-07-2011
Aceptado
07-09-2011
Publicado
01-01-2012

Palabras Claves:
GPR
Radar de subsuelo
Pavimentos
asfálticos
Ensayos no destructivos

Article history:

Received
04-07-2011
Accepted
07-09-2011
Available
01-01-2012

Keywords:
GPR
Ground penetrating radar
Asphalt pavements
Non destructive testing

Actualmente, uno de los métodos no-destructivos más efectivos para determinar el espesor de un firme es la prospección mediante radar de subsuelo (Ground-Penetrating Radar, GPR), ya que permite la adquisición de datos con una resolución adecuada, a velocidades que no impiden la utilización de la vía al resto de usuarios. Este método de prospección, basado en la detección de discontinuidades electromagnéticas en el interior de un medio, permite registrar el tiempo de propagación de una señal electromagnética, desde que se emite hasta que se recibe tras su posterior reflexión en la discontinuidad. El registro de tiempos, cuando se puede determinar la velocidad de propagación, se utiliza para calcular espesores de capas de la mezcla bituminosa. Sin embargo, la velocidad es un parámetro que depende de muchos factores: materiales del medio, frecuencia de la señal, porosidad, grado de saturación, etc. Esta dependencia hace que, sobre todo cuando la adquisición de datos se realiza sobre capas de firme sometidas a ciclos de carga, se pueda introducir una cierta indeterminación en el cálculo de los espesores debido a posibles cambios laterales en las características físicas del medio, pudiendo producirse un aumento de la velocidad si en las capas inferiores se produce un aumento del índice de huecos. En este estudio se analiza el efecto del contenido de huecos en la composición de las mezclas bituminosas, en la velocidad de propagación de ondas electromagnéticas. Para ello se analizan firmes que presentan diversos estados de conservación. Los resultados permiten asociar los índices de huecos más elevados con velocidades de propagación superiores a las esperadas en los materiales del medio. En este artículo se proponen algunas posibles correcciones que permiten obtener una interpretación de los registros más precisa.

Abstract

At the present, ground penetrating radar (GPR) is considered one of the most effective methods to evaluate thicknesses of pavement roads, because data acquisition velocity can be enough to allow the use of the road to the users, without significant lost of resolution. The purpose in a GPR survey is to detect electromagnetic discontinuities existing in a medium. Radar data is represented as changes in the signal amplitude, referred to the time of propagation and the trace position. The two-way travel propagation time is converted into depth by knowing the wave velocity. However, velocity is a parameter difficult to determine because of its dependence on many factors: mineral grain, signal frequency, porosity, water content, etc. The uncertainty on the relation between physical parameters and the velocity produces also indeterminacy on the estimation of pavement thicknesses, especially as the survey is carried out on roads under heavy and continuous loads. In these roads, unexpected changes in the velocity could be produced due to lateral changes in the porosity of the lower layers of the pavement.

In this paper, the effects of the bituminous materials porosity on the wave velocity are evaluated. In this way, several road pavements, presenting different conditions, are surveyed with GPR. Results allow defining a relationship between the bituminous porosity and the wave velocity, obtaining higher values than the expected ones in the case of layers with significant porosity. Some experimental relationships are used to correct the thickness estimation of the layers, in order to consider lateral changes in porous or voids.

1. Introducción

Una capa de mezcla bituminosa, cualquiera que sea su situación en el firme, está compuesta por un elevado contenido de árido, el ligante (betún) que lo recubre, y un número determinado de huecos, más o menos elevado en función del tipo de mezcla y del proceso de compactación que haya sufrido.

Los porcentajes de mineral y ligante suelen ser similares en la composición de cualquier mezcla, siendo la relación del ligante respecto al conjunto alrededor del 4% en mezclas gruesas y del 5% en mezclas con tamaño máximo de árido más fino. Sin embargo, el número de huecos de una capa presenta una mayor variación en función de la mezcla y su posición en el firme. Mientras que para una capa intermedia, se suele usar una mezcla cerrada con un porcentaje de huecos en torno al 3-4%, una capa de tipo base suele presentar una relación de huecos alrededor del 8-9%. Por otro lado, una mezcla de tipo abierta utilizada comúnmente como capa de rodadura, debe presentar un contenido de huecos mínimo del 12%.

Además, se sabe que el proceso de fatiga en un firme flexible en servicio favorece la aparición de microfisuras por flexotracción en las capas inferiores de mezcla, propagándose a medida que se incrementa el número de ciclos, hasta llegar a la superficie [1,2]. Estas fisuras suelen aparecer y propagarse a través las zonas de contacto entre áridos, donde el ligante que los recubre ya no es capaz de soportar las deformaciones producidas por el paso de vehículos en la calzada.

Los métodos analíticos tradicionales utilizados para el diseño de refuerzos en firmes flexibles analizan la función estructural del conjunto del firme, calculándola a partir de las variables espesor y módulo de rigidez de cada una de las capas del firme, obteniéndose la primera a través de la extracción de testigos y la segunda de los resultados obtenidos mediante ensayo de deflectometría. Sin embargo, dada la necesidad de minimizar los efectos indeseados que produce la extracción de testigos en un pavimento asfáltico, la tendencia es utilizar indicadores alternativos asociados al cuenco de deflexiones obtenido mediante un ensayo con deflectómetro de impacto (FWD). Este hecho, aunque permite omitir la necesidad de conocer el espesor de las capas que forman las estructuras, añade ciertas incertidumbres en los métodos de cálculo de tipo iterativo como el cálculo inverso.

Por este motivo, se ha introducido el uso del "Ground Penetrating Radar" (GPR) como ensayo no destructivo de apoyo en los estudios de firmes y de pavimentos [3,4,5,6], ya que permite obtener el espesor de las capas del firme, reduciendo variables independientes en los cálculos, disminuyendo así sus niveles de incertidumbre.

Este método de prospección geofísica de reflexión de señales electromagnéticas, se basa en la obtención de los tiempos de propagación de una onda que atraviesa un medio material delimitado por dos discontinuidades electromagnéticas. La señal se refleja en estas discontinuidades, de tal manera que es posible registrar dos reflexiones continuas, identificables y medibles. La velocidad de la señal en el interior de un medio depende, entre otros factores, de la presencia de huecos. En medios secos, esta velocidad aumenta conforme aumenta la porosidad del medio. En medios porosos saturados o con un alto grado de saturación la velocidad disminuye drásticamente, comparada con la resultante en medios con bajo grado de saturación o secos. Esto es debido a que en el aire la velocidad es próxima a los 30 cm/ns, en minerales está situada entre los 11 cm/ns y los 15 cm/ns, y en el agua es cercana a los 3 cm/ns.

Es necesario considerar estos cambios en la velocidad debidos a variaciones en la porosidad y en el contenido de agua del medio cuando se utiliza este método para calcular el espesor de una capa de mezcla bituminosa ya que la presencia de aire (huecos, grietas y deterioro en general) en determinadas capas del firme, aumentará la velocidad de propagación de la señal, registrando unos tiempos diferentes de los previstos inicialmente.

Por este motivo, aun siendo relevantes las bondades del método, en especial en su aplicación sobre capas de firme nuevas, pueden generarse dudas acerca de su fiabilidad en la determinación del espesor de una capa de mezcla sometida a desgaste por fatiga, donde la mayor presencia de huecos en las capas inferiores, bien por naturaleza de la mezcla o por fisuración de la misma, añaden incertidumbre a la interpretación.

Para una adecuada interpretación de los datos obtenidos con este método, los efectos del desgaste de los materiales sobre la señal registrada son un aspecto que debe considerarse cuidadosamente. Sin embargo, dada la dificultad inherente a esta casuística, son pocas las evaluaciones realizadas. En este campo hay que mencionar los trabajos de [7, 8, 9, 10]. En el primero se realiza una recopilación de diferentes trabajos y resultados en el estudio de capas de pavimento, haciendo hincapié en los efectos de la humedad, del espesor de las diferentes capas y de los defectos de capas inferiores. En el segundo se realizaron experimentos durante la construcción de una carretera, para determinar constantes dieléctricas de 12 tipos de pavimento flexible. En el tercero se analiza la detección de capas de pavimento mediante medidas continuas, comparando resultados con ensayos de laboratorio sobre testigos. En el cuarto se desarrolla una técnica de detección automática mediante GPR de capas de pequeño grosor, respecto de la longitud de onda de la señal. En otros estudios, aunque no directamente relacionados con firmes de carretera, se ha analizado el efecto del contenido de agua en un medio [11, 12, 13, 14], la detección de huecos [15], la resolución de diferentes antenas [16, 17, 18] o el efecto de daños en pavimentos [19, 20].

En los ensayos que se presentan en este trabajo se observa que la velocidad de propagación de onda aplicada a un pavimento bituminoso no es lineal y que es variable en respuesta a la presencia de huecos en una mezcla bituminosa. Este efecto se puede identificar mediante el uso del ensayo de reflexión electromagnética con GPR, aplicado a distintos firmes con secciones constructivas, con distinta relación de huecos en su composición bien sea por la composición de la propia mezcla o bien por causas ajenas debidas a la presencia de fisuras indeseadas.

2. Principios de la propagación de las ondas electromagnéticas

La prospección mediante GPR se realiza emitiendo una onda electromagnética, mediante una antena emisora. La señal se propaga por el interior del medio y se reflejan en las superficies de contacto que separan dos materiales caracterizados por parámetros electromagnéticos distintos. En cada una de estas discontinuidades, parte de la energía que incide se refleja y se propaga hacia la superficie, y parte de la energía incidente se propaga, modificando su dirección, hacia el interior del medio. La señal reflejada alcanza la superficie, donde una antena receptora la detecta y registra su tiempo de llegada. Una completa descripción del método y de sus aplicaciones puede obtenerse, por ejemplo, en Annan [21] y en Daniels [22].

Las discontinuidades electromagnéticas representan cambios bruscos en la permitividad dieléctrica, en la conductividad eléctrica o en la permeabilidad magnética, de manera que en el estudio mediante GPR se detectan estos cambios. Hay que tener en cuenta que estos parámetros dependen en gran medida del índice de poros del medio y del grado de saturación.

Un equipo de GPR consiste en dos antenas (emisora y receptora) o bien en una única antena de conmutación (parte del tiempo emite y posteriormente conmuta y pasa a tener una función receptora), y una unidad central que controla la emisión y recepción y que puede estar unida a un ordenador donde quedan registradas las llegadas de la señal. Este equipo suele ir conectado a algún dispositivo que permite posicionar los puntos del perfil. Puede ser un odómetro o un GPS. Para realizar la adquisición de datos, una metodología habitual es desplazar el equipo por la superficie del medio que se desea estudiar, emitiendo y registrando las señales con una frecuencia que selecciona cada usuario en función de las necesidades del estudio y que puede permitir una separación entre pulsos de varios centímetros o de, incluso, medio centímetro. Con esta forma de adquirir datos se obtiene una pseudosección del interior del medio, que, en función de los parámetros de adquisición seleccionados, puede considerarse un perfil continuo. Dependiendo de la resolución que se desee

obtener y de la profundidad que sea necesario alcanzar, la velocidad de adquisición de datos puede estar comprendida entre los 40 km/h y los 80 km/h.

En el caso de la evaluación de un pavimento asfáltico, la señal registrada mostrará un incremento en la amplitud correspondiente a las ondas reflejadas que alcanzan de nuevo la superficie. De este modo, cada incremento de amplitud observado de forma continua a lo largo del perfil puede indicar la existencia de una superficie reflectora que, posiblemente, estará asociada con el contacto entre capas diferentes. Elementos de pequeño tamaño, como oquedades u objetos embebidos en el interior del medio, también pueden quedar registrados como una anomalía en la señal de radar, correspondiendo también con un aumento de la amplitud registrada. Un esbozo de este funcionamiento se detalla en la figura 1.

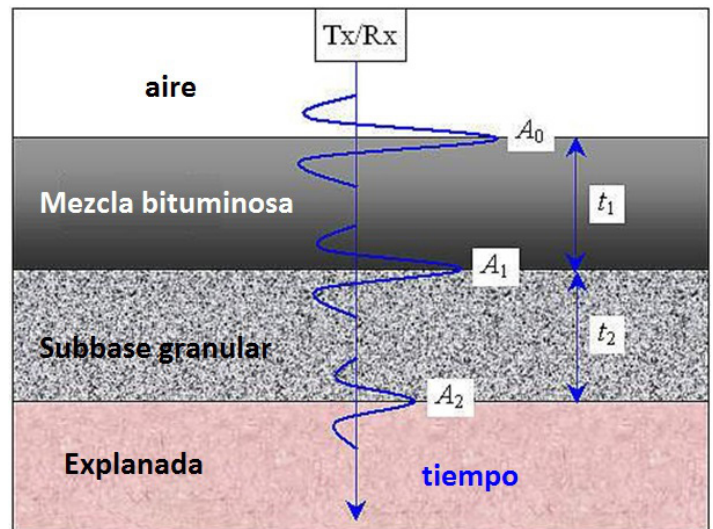


Figura 1. Esquema que muestra la propagación de una señal por un medio de tres capas, representando los incrementos de amplitud que se producen debido a la reflexión en las superficies de separación (modificado de [23]).

En esta figura se esquematiza la forma en la cual la señal que emite la antena Rx se propaga por el interior del medio y se refleja en las superficies que se corresponden con zonas que presentan cambios bruscos en los parámetros electromagnéticos. Estas superficies se asocian en el radargrama con anomalías generadas por un aumento de la amplitud de la señal. En esta figura A₀ es la amplitud de la señal reflejada en la superficie del pavimento, A₁ es la amplitud de la señal que se refleja en el contacto entre la mezcla bituminosa y la parte superior de la base granular, A₂ es la amplitud de la señal reflejada en la superficie de separación de la base granular con la subrasante. El tiempo t₁ se corresponde con el incremento de tiempo doble registrado entre las anomalías correspondientes a la reflexión en la superficie y la reflexión en el primer contacto. El tiempo t₂ se corresponde con el incremento de tiempo doble entre los el primer contacto y el segundo.

Para realizar la conversión del tiempo doble de propagación reg-

istrado a espesores y profundidades, es necesario conocer la velocidad de propagación de la señal (v). Este proceso, una vez determinada esta velocidad, podría ser automático en el estudio de pavimentos si la mezcla bituminosa fuese continua y homogénea. Sin embargo, esta condición nunca se cumple dado que la mezcla bituminosa está formada por varias capas, que han sido extendidas y compactadas bajo unas condiciones físicas diferentes, presentando además, diferentes composiciones granulométricas y de contenido en huecos. Por este motivo se debe considerar que en un pavimento existen materiales en una misma capa con propiedades dieléctricas diferentes, de tal manera que la señal registrada presentará un comportamiento distinto en cada zona. En consecuencia, la velocidad de propagación podrá verse alterada dentro de una misma capa del mismo pavimento. Esto hace que los tiempos registrados para la señal reflejada en las discontinuidades del medio pueden cambiar aunque la discontinuidad sea la misma y la capa presente un espesor constante. Si estos cambios en la velocidad no se tienen en cuenta, se realizará la conversión de tiempo doble en profundidad utilizando un valor de la velocidad constante. El resultado será una interpretación en la que se habrá introducido un error importante en el espesor de las capas en determinadas zonas. El objetivo de este trabajo es analizar la relación entre el índice de poros de una mezcla y la velocidad de propagación de la señal, de manera que, en ensayos posteriores, puedan realizarse correcciones que mejoren la interpretación de los registros.

La velocidad de la señal por el interior del medio depende de la permitividad dieléctrica (ϵ_r), de la permeabilidad magnética (μ_r), de la conductividad (σ) y del pulso de la señal (ω). En medios no magnéticos y bajas pérdida ($\sigma \ll \omega\epsilon_r$), como es el caso de las mezclas asfálticas, la velocidad puede considerarse únicamente en función de la permitividad dieléctrica relativa:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

Donde c es una constante correspondiente a la velocidad de propagación de una onda electromagnética por el vacío (aproximadamente, 30 cm/ns).

Por lo tanto, en este tipo de medios, conocido el valor de ϵ_r , es posible determinar la velocidad de propagación de la onda, que puede representarse mediante una curva (figura 2), en la que dos valores extremos serían $\epsilon_r = 1$ (para el aire) y $\epsilon_r = 81$ (para el agua). En estudios de firmes flexibles, los valores de la permitividad dieléctrica relativa de las mezclas bituminosas suelen estar situados entre 7 y 8, aproximadamente [24]:

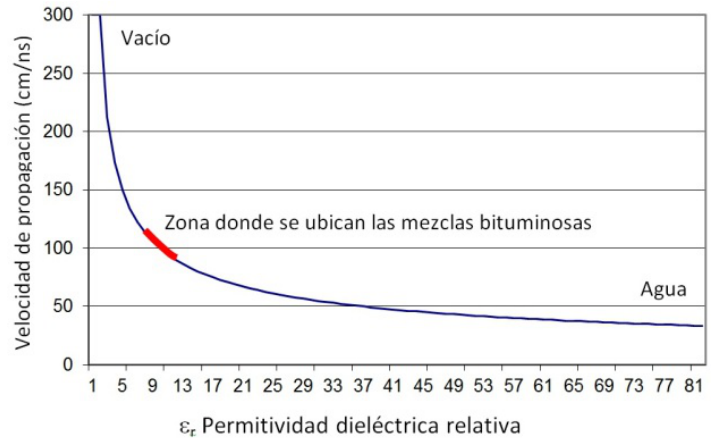


Figura 2. Relación entre la velocidad de propagación de la onda y la permitividad dieléctrica relativa, ϵ_r , del medio.

El primer trabajo riguroso en España para determinar los parámetros electromagnéticos que permiten el cálculo de los espesores de las capas de firme es el publicado en la tesis doctoral de Enrique de Lorenzo en 1996 [24]. En este trabajo se realizan varios ensayos, de carácter cuantitativo para evaluar la viabilidad del uso del georradar en el estudio del espesor de las diferentes capas que forman un firme. Algunos resultados obtenidos en este estudio con una antena apantallada de 900 MHz situada a una distancia de 20 cm de la pista de rodadura, se muestran en la tabla 1:

Para realizar la conversión del tiempo doble de propagación registrado a espesores y profundidades, es necesario conocer la velocidad de propagación de la señal (v). Este proceso, una vez determinada esta velocidad, podría ser automático en el estudio de pavimentos si la mezcla bituminosa fuese continua y homogénea. Sin embargo, esta condición nunca se cumple dado que la mezcla bituminosa está formada por varias capas, que han sido extendidas y compactadas bajo unas condiciones físicas diferentes, presentando además, diferentes composiciones granulométricas y de contenido en huecos. Por este motivo se debe considerar que en un pavimento existen materiales en una misma capa con propiedades dieléctricas diferentes, de tal manera que la señal registrada presentará un comportamiento distinto en cada zona. En consecuencia, la velocidad de propagación podrá verse alterada dentro de una misma capa del mismo pavimento. Esto hace que los tiempos registrados para la señal reflejada en las discontinuidades del medio pueden cambiar aunque la discontinuidad sea la misma y la capa presente un espesor constante. Si estos cambios en la velocidad no se tienen en cuenta, se realizará la conversión de tiempo doble en profundidad utilizando un valor de la velocidad constante. El resultado será una interpretación en la que se habrá introducido un error importante en el espesor de las capas en determinadas zonas. El objetivo de este trabajo es analizar la relación entre el índice de poros de una mezcla y la velocidad de propagación de la señal, de manera que, en ensayos posteriores, puedan realizarse correcciones que mejoren la interpretación de los registros.

material	ϵ_r	λ (mS/m)	Desviación en la estimación de espesores % (nº muestras)
Mezcla bituminosa	7,6 a 8,2	0,001	7,9 % (12)
Zahorra artificial	4,5 a 4,8	0,001	5 % (5)
Zahorra natural	11,2	0,001	5 % (5)
Gravas tratadas	15,9	0,1	> 8% (2)

Tabla 1. Principales parámetros obtenidos experimentalmente para materiales presentes en un firme [24].

3. Ensayos

Las medidas experimentales se realizaron tras una cuidadosa selección de datos necesarios para el estudio y de las zonas a estudiar. También se decidieron los ensayos complementarios para comparar resultados: deflectometría y extracción de testigos.

3.1 Datos necesarios para el estudio

Para proceder a identificar una posible relación entre la presencia de huecos en una mezcla bituminosa y la velocidad de propagación de una onda electromagnética es necesario escoger un conjunto de secciones de firme que deberán ser sometidas a distintos ensayos.

Para maximizar el contraste de los efectos de la presencia de aire en una mezcla bituminosa y que sean visibles en un número mínimo de muestras, se han escogido secciones de firme con un importante paquete estructural, a ser posible con un espesor de mezcla superior a los 30 cm., con presencia de capas abiertas y cerradas en su configuración y en distintos niveles de estado de capacidad estructural. Dicho estado se evaluó mediante un ensayo de deflectometría.

Para ello, se seleccionaron varios tramos de carreteras de alta capacidad, con una sección de firme esperada muy importante, donde se realizaron ensayos continuos de reflexión electromagnética mediante GPR y deflexión mediante deflectógrafo "Lacroix". Además se procedió a extraer selectivamente un conjunto de testigos en los puntos de mayor interés.

3.2. Selección de los ensayos

Cada uno de los tramos de carretera se evaluó utilizando tres ensayos diferentes: GPR, deflexión y extracción de testigos. Los datos procedentes de los dos últimos reconocimientos se utilizaron para comparar los resultados de velocidad obtenidos con GPR en cada sección de mezcla bituminosa de un pavimento asfáltico. Esto ha permitido la validación de los resultados finales considerando la media de la deflexión en el punto de aplicación de la carga mediante un equipo normalizado, el tiempo de propagación de la señal y la medida directa de espesores mediante la extracción de testigos.

Medida del tiempo de propagación de la onda

Los datos obtenidos con GPR se utilizaron para obtener el tiempo transcurrido entre las reflexiones producidas en la superficie del pavimento y en la superficie de contacto entre la mezcla bituminosa y la sub-base granular, sea ésta tratada con cemento o no. La adquisición de datos se realizó de forma continua sobre un tramo de carretera largo, con distintas secciones de firme, a una velocidad promedio de 60 km/h. Esta velocidad se decidió para poder obtener información suficiente del pavimento sin provocar interferencias innecesarias en el tráfico de la vía seleccionada.

Medida de la deflexión en el punto de aplicación de la carga mediante un equipo normalizado

El equipo utilizado para la medida de la deflexión es el deflectógrafo "Lacroix" provisto de una viga Benkelman que mide la deflexión bajo la aplicación de la carga de un eje normalizado de 128 KN con una equidistancia de 5 metros. Dicho eje corresponde a la aplicación de una fuerza de 65 KN utilizado habitualmente en Estados Unidos con el equipo FWD. Los resultados obtenidos se utilizaron en este trabajo para determinar el estado estructural de la sección de firme y buscar correlaciones entre velocidades de propagación de onda y niveles de deflexión.

Medida directa de espesores mediante la extracción de testigos

Se realizó la extracción en puntos seleccionados utilizando los resultados de GPR y de deflectometría. Los puntos de extracción de testigos se seleccionaron en zonas con diferentes niveles de deflexión y que presentan un nivel de regularidad constante en los datos de los dos ensayos previos (deflexión y tiempo de reflexión). De esta forma se pretendía minimizar el posible error de correspondencia en la ubicación física entre la información obtenida por ambos ensayos y el testigo extraído.

3.3. Elección de los puntos donde obtener las muestras mediante extracción de testigos

La extracción de testigos fue un proceso posterior a los dos ensayos, y se realizó en las zonas que se seleccionaron sobre los registros deflectométría y de GPR. En la figura 3 se presenta un ejemplo que muestra los datos obtenidos en un tramo de carretera mediante un diagrama de deflexiones y un radargrama. Los registros se corresponden con un tramo de 1000 m. de la vía rápida C-2 (pk 235-237), en Girona (España). El firme en esta zona presentaba un elevado espesor de mezcla bituminosa.

En el diagrama de deflexiones (diagrama de barras) se presenta la deflexión patrón obtenida mediante la aplicación de una carga normalizada cada 5 m., así como la deflexión característica (dk) obtenida como la media más dos veces la desviación del conjunto de muestras del tramo, y que equivale aproximadamente al percentil 97,5 de todas ellas. Por otro lado, en el radargrama se presenta el tiempo doble de propagación entre las reflexiones producidas en la superficie del pavimento y en la superficie de contacto entre la mezcla bituminosa y la subbase granular.

Comparando ambos diagramas puede observarse una cierta correlación entre el tiempo de reflexión y la deflexión característica. Esta correlación indicaría que, a mayor tiempo de reflexión, menor deflexión. Es un resultado esperado ya que, generalmente, un mayor tiempo de reflexión implica un espesor mayor de capa, asociada a una capacidad portante del firme más elevada.

La extracción selectiva de testigos se realizó para poder definir la relación entre espesores de aglomerado (h) y tiempos de propagación de la señal (t). La relación se obtuvo mediante una regresión de los valores definidos para las muestras extraídas en zonas de deflexión equivalente. Por este motivo los puntos para la extracción de testigos se seleccionaron en las zonas en las que se observa-

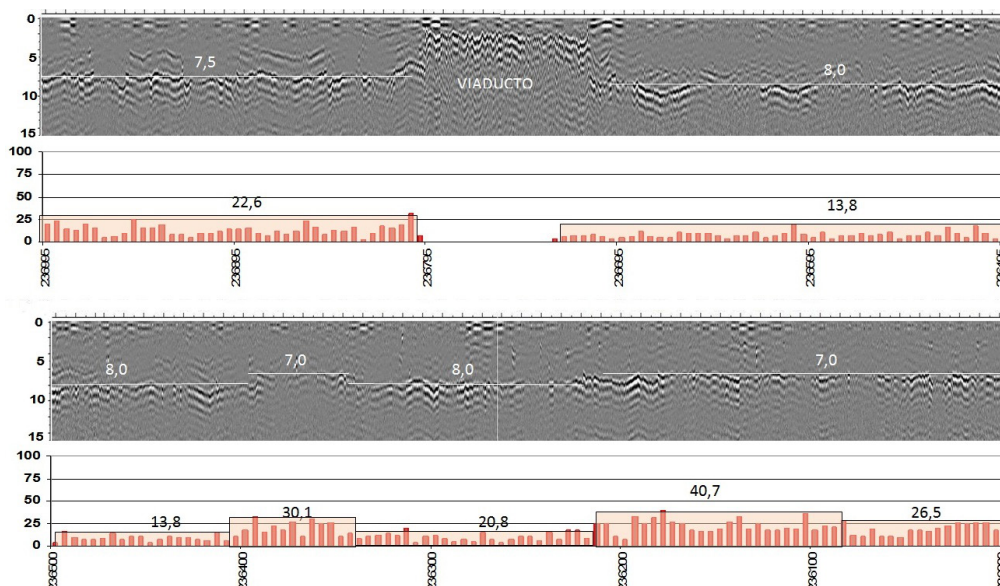
ban tiempos de propagación adecuados a los niveles de deflexión.

En el tramo de carretera mostrado se han marcado tres puntos de extracción de testigos, situados en los pk 236+700, 236+060 y 236+180. Los dos primeros se han seleccionado con el objetivo de obtener dos muestras con el firme en perfecto estado. En estas zonas los tiempos dobles de propagación medidos han sido de $t=8ns$ y $t=7ns$, respectivamente, presentando unas deflexiones características bajas ($dk= 13,8$ y $26,5$ mm/100 respectivamente). El tercer punto se seleccionó para evaluar las causas de una deflexión más elevada ($dk= 40,7$ mm/100) en un sector donde el tiempo doble de propagación era también alto ($t=7$ ns):

Como el objetivo del trabajo es observar la influencia de la composición de las mezclas bituminosas en la velocidad de propagación de señales electromagnéticas, se seleccionaron dos carreteras con un elevado nivel de tráfico, cuyas políticas de conservación de firmes hasta día de hoy habían sido dispares. De este modo se aseguraba una cierta heterogeneidad en los datos.

El primer tramo de estudio se realiza sobre el firme de la carretera C-1 ubicada en los accesos a la ciudad de Barcelona (España), entre los pk 8+000 y 14+000. Esta vía, puesta en servicio el año 1991, se construyó sobre una subbase tratada con cemento, y a día de hoy no ha sufrido ningún problema estructural relevante. Las tareas de conservación ordinaria han consistido en el fresado y reposición de las mezclas de rodadura abiertas o, en algunos casos, en la incorporación a la estructura de capas intermedias cerradas. El ensayo de deflectometría ha mostrado niveles de deflexión muy bajos.

El segundo tramo de firme estudiado, se sitúa en la vía rápida C-2 (pk 226-237).



4. Resultados

En los dos tramos seleccionados se procedió a la adquisición de datos y a la posterior extracción de testigos. Los resultados se analizaron teniendo en cuenta los efectos del nivel de huecos y del espesor del firme.

4.1. Análisis de los testigos

La evaluación de los testigos se realizó identificando cada capa y aislando el porcentaje de mezclas tipo abierta o semi-cerrada del resto. Se elaboraron tablas que relacionaban cada testigo con la velocidad promedio de propagación de onda en el conjunto del firme (v), calculada como el cociente entre el espesor total (h) y el tiempo simple de propagación desde la superficie del pavimento hasta la superficie de contacto entre la mezcla bituminosa y la sub-base (t).

a) Caso C-1: en buen estado de conservación

En los testigos extraídos de la carretera C-1, se observan cuatro capas (figura 4): capa de rodadura tipo BBTM 11B abierta (R), capa intermedia tipo AC22binS cerrada (I), capa base 2 tipo AC32baseS cerrada (B2) y capa base 1 tipo AC32baseG semi-cerrada (B1).

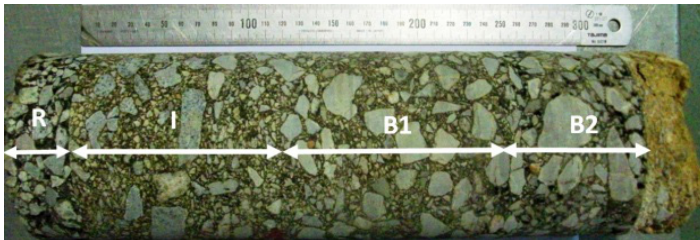


Figura 4. Testigo extraído en la carretera C-1. Se indican las cuatro capas identificadas (R, I, B1 y B2)

Los resultados de todos los testigos extraídos en esta carretera se resumen en las tablas 2A y 2B. En las tablas se muestra el punto de extracción del testigo (pk), su espesor total (h), el tiempo de propagación obtenido con el ensayo de GPR (t), la velocidad estimada como el cociente entre espesor y tiempo de propagación (v), así como el espesor de cada una de las capas identificadas y la relación porcentual de mezclas abiertas o semi-cerradas. Estos datos muestran que las capas de base y rodadura presentan unos valores de espesor más estables, mientras que la capa intermedia es la que sufre una mayor variabilidad respecto a la media del conjunto de firme. Estas características del firme son debidas a la estrategia de conservación seguida. Se observa también que la relación de mezclas abiertas o semi-cerradas respecto del conjunto es muy bajo.

Tabla 2A. Cálculo de la velocidad de propagación a partir del espesor total del testigo (h) y el tiempo de propagación (t).

pk	h (cm)	t (ns)	v (cm/ns)
8+810	29,4	6,1	9,64
9+920	23,8	4,5	10,58
13+010	30,8	6,3	9,78
13+110	26,8	5,4	9,93
8+750	28,3	5,7	9,93
8+600	27,9	5,5	10,15

Tabla 2A. Cálculo de la velocidad de propagación a partir del espesor total del testigo (h) y el tiempo de propagación (t).

pk	R (cm)	I (cm)	B1 (cm)	B2 (cm)	% abiertas o semi-cerradas
8+810	1,7	7,0	12,2	8,5	0,473
9+920	1,6	5,8	11,0	5,4	0,529
13+010	2,4	10,0	12,0	6,4	0,468
13+110	2,9	8,9	10,0	5,0	0,481
8+750	1,6	4,9	12,0	9,8	0,481
8+600	2,0	6,3	12,6	7,0	0,523

b) Caso C-2: en estado de conservación irregular

Los testigos extraídos en la carretera C-2 muestran, en general, cuatro capas. En la figura 5 se presenta una de las muestras sobre la que se indican las capas identificadas: capa de rodadura tipo BBTM 11B abierta (R), capa intermedia tipo AC22binS cerrada (I), capa base 2 (B2) y capa base 1 (B1), ambas de tipo AC32baseG semi-cerrada.

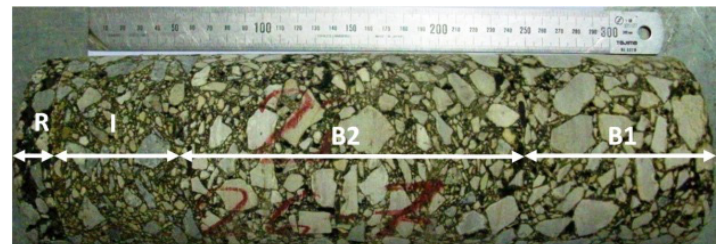


Figura 5. Testigo extraído en la carretera C-2. Se indican las cuatro capas identificadas (R, I, B1 y B2)

Tabla 3A. Cálculo de la velocidad de propagación a partir de “h” y “t”. Valor “dk” correspondiente al punto de extracción.

pk	R (cm)	dk (mm/100)	t (ns)	v (cm/ns)
236+700	45,6	12,4	8,1	11,40
236+180	36,3	40,7	-	(*)
236+060	36,0	26,5	7,0	10,36
235+230	26,1	35,5	5,7	9,12
235+020	27,7	20,1	5,9	9,35
234+810	31,4	29,0	6,4	9,84
233+530	24,3	29,4	5,5	8,83
233+170	25,2	29,2	5,6	8,98
231+640	34,2	27,9	6,7	10,17
230+320	34,3	48,4	-	(*)
230+030	16,7	rígido	4,6	7,32
229+400	34,9	17,7	6,8	10,24
228+790	29,3	26,1	6,1	9,57
227+900	32,7	19,8	6,5	10,00
227+120	33,4	50,2	-	(*)
226+700	32,2	60,8	-	(*)

Tabla 3B. Espesor de cada capa bituminosa y la relación porcentual entre la mezcla semi-cerrada utilizada en el recrecimiento del firme, del resto.

pk	R (cm)	I (cm)	B2 (cm)	B1 (cm)	% abiertas o semi-cerradas
236+700	2,6	10,3	17,5	15,2	(**)
236+180	-	-	-	-	-
236+060	6,9	7,2	8,1	13,8	(**)
235+230	3,0	5,7	3,8	13,6	0,67
235+020	2,9	6,1	4,5	14,2	0,68
234+810	2,8	5,3	9,2	14,1	0,74
233+530	2,3	4,2	13,1	4,7	(**)
233+170	3	4,7	5,9	11,6	0,69
231+640	3,8	3,6	11,7	15,1	0,78
230+320	-	-	-	-	-
230+030	4,0	-	-	12,7	(**)
229+400	3,1	4,5	9,4	17,9	0,78
228+790	2,0	5,3	10,4	11,6	0,75
227+900	3,1	4,0	10,6	15,0	0,78
227+120	-	-	-	-	-
226+700	-	-	-	-	-

4.1. Análisis de los testigos

Se estudió el efecto del índice de huecos del conjunto de la mezcla en la velocidad de propagación obtenida para la señal de GPR en el caso de una carretera con un firme en buen estado de conservación (carretera C-1). Se representó gráficamente la velocidad de propagación de la onda, obtenida como el cociente entre el espesor medido para las muestras directas y el tiempo simple de propagación registrado mediante el ensayo con GPR, respecto del porcentaje de mezclas abiertas o semi-cerradas existentes en el conjunto del firme (figura 6). La gráfica muestra que la relación existente entre ambas variables puede considerarse lineal, obteniéndose una mayor velocidad de propagación en los casos de mayor proporción de mezclas abiertas o semi-cerradas. Mediante una regresión se obtuvo la relación entre estas variables (ecuación 2):

$$v = 11.178 (\% \text{ mezcla}) + 4.494 \quad (2)$$

La relación (2) únicamente puede considerarse como una tendencia observada ya que no se disponen de datos suficientes para definir una relación empírica aplicable a todos los casos de firmes en buen estado de la tipología observada en la carretera C-1.

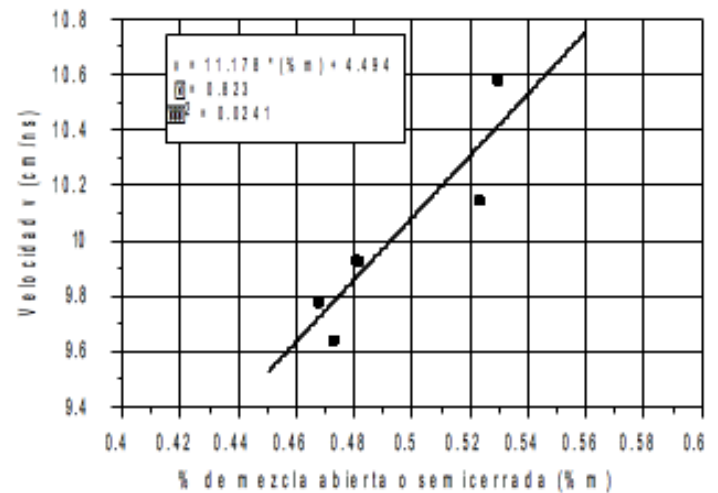


Figura 6. Relación entre el porcentaje de mezcla abierta o semi-cerrada y la velocidad de propagación. La línea continua es únicamente orientativa, y se dibuja con el propósito de mostrar la tendencia de los resultados obtenidos.

Por otro lado, la relación entre la velocidad de propagación de la onda y el espesor total medido en los testigos, muestra la tendencia de la velocidad a disminuir a medida que el espesor aumenta. Es posible que este efecto sea debido a que a medida que aumenta el espesor, también aumenta la proporción de mezclas cerradas respecto del conjunto (figura 7).

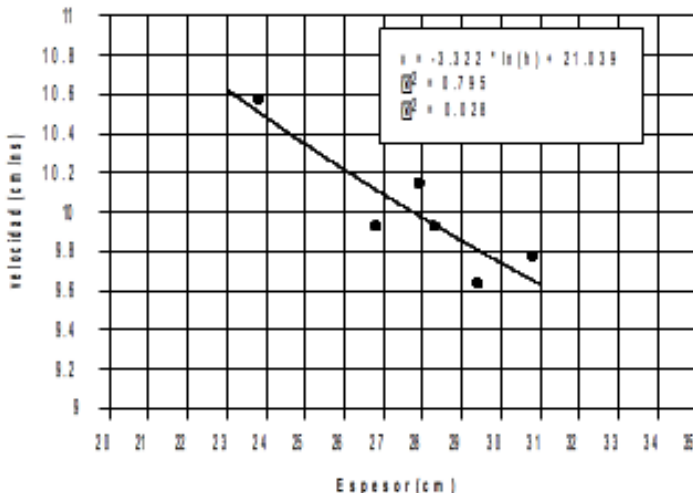


Figura 7. Relación entre espesores y velocidad de propagación. La línea continua muestra la tendencia de los datos experimentales.

Aunque se trata de resultados preliminares y de un número de puntos de medida pequeños, parece que la tendencia observada en la gráfica de la figura 6 es lineal, mientras que la tendencia que se aprecia en la gráfica de la figura 7 parece ser logarítmica (ecuación 3). Esto indicaría que la velocidad de propagación medida en un firme es linealmente dependiente del porcentaje de mezcla abierta o semi-cerrada, pudiendo considerarse la relación entre la velocidad y el espesor de la muestra como logarítmica. En este segundo caso se podría llegar a considerar la existencia de una velocidad estable en el caso de tener un espesor de mezcla infinita, ya que el aporte de una mezcla tipo cerrada al conjunto del sistema sería irrelevante.

$$v = -3.317 \ln(h) + 21.021 \quad (3)$$

Para las muestras dadas, y utilizando las relaciones obtenidas en los ajustes de las variables, se pueden obtener las velocidades previstas.

Los datos de las velocidades de propagación corregidas, v_c , que se muestran en la tabla 4 son valores resultantes de aplicar la ecuación 3 para un determinado intervalo de espesores entre los 20 cm y los 40 cm:

Tabla 4. Velocidades corregidas, v_c , según la aplicación de la relación logarítmica obtenida para el firme de la carretera C-1 (ecuación 3).

h (cm)	Vc (cm/ns)
20	11,09
25	10,35
30	9,74
35	9,23
40	8,78
Δh (cm)	ΔVc (cm/ns)
20	2,31

De la observación de la tabla se deduce que la diferencia entre los umbrales extremos corresponde a una reducción de velocidad de propagación de 2,31 cm/ns en un diferencial de espesor de 20 cm. Esto indica que, en este firme en presuntas buenas condiciones, la incorporación de nuevos recrecidos de mezcla cerrada al sistema, ha provocado una reducción de velocidad de propagación entorno al 11,5%.

4.3. Efecto del espesor de mezcla bituminosa en la deflexión del firme (carretera C-2)

Para realizar una evaluación aproximada del estado estructural en el que se encuentra el tramo de carretera donde se han extraído muestras se representa la relación entre el espesor medido directamente sobre el testigo h y la d_k correspondiente. En las gráficas obtenidas

(figura 8) se observan dos tendencias (tendencias A y B en la figura 8).

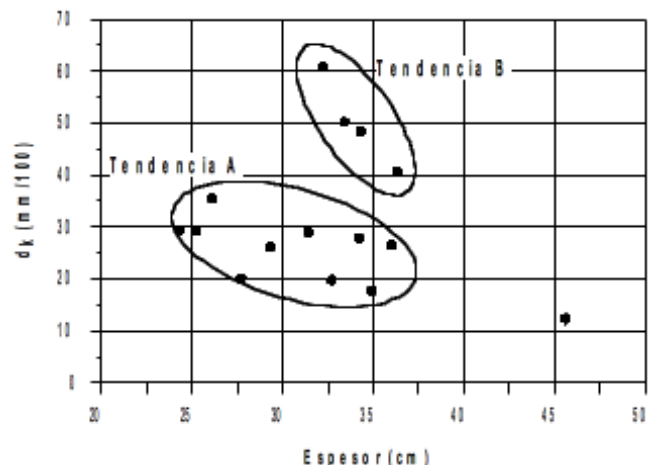


Figura 8. Diagrama de dispersión de las variables h y d_k para los testigos de la carretera C-2.

La tendencia A se caracteriza por presentar valores de dk más bajos, lo que se corresponde con una mejor calidad estructural del firme. En este caso se observa que al disminuir el espesor del firme, aumenta suavemente la deflexión, aunque con un elevado grado de dispersión. En el caso de la tendencia B, caracterizada por mayores valores de dk, la deflexión aumenta rápidamente a medida que el espesor decrece.

Las conclusiones que se pueden extraer de estos resultados son que, en el caso de muestras con menor dk (tendencia A), el espesor, aun siendo una variable que incide de forma importante en la deflexión, no es la única. Por otro lado, en el caso de las muestras con peor nivel de deflexión (tendencia B) puede deducirse que el espesor es el factor determinante que produce el incremento de la deflexión. Sin embargo, en el trabajo que se describe en este artículo se consideran únicamente las muestras con deflexiones adecuadas y que, por lo tanto, siguen la tendencia A, omitiendo el resto de muestras. Se ha seguido este criterio de selección porque no es posible asegurar que la elevada deflexión en las muestras que siguen la tendencia B, sea por la existencia de un mayor número de oquedades en el medio, aun siendo por efectos de la fisuración de la propia mezcla. El elevado valor de dk también podría deberse a fallos en la explanada o a la presencia localizada de humedad en la sub-rasante.

Como en el caso de las muestras tomadas en la carretera C-1, la representación de la variable velocidad de propagación de onda (v) en función del porcentaje de mezclas abiertas o semi-cerradas presentes en el conjunto del firme, también muestra la existencia de una relación entre ambas variables. Se observa que; a mayor proporción de dichas mezclas abiertas o semi-cerradas, se obtiene una mayor velocidad de propagación de la onda electromagnética (figura 9). Un ajuste de regresión de los datos experimentales permite obtener una tendencia representada por la ecuación 4. Esta relación debe entenderse como una aproximación experimental a la tendencia observada.

$$v = 9.414 (\% \text{ mezcla}) + 2.750 \quad (4)$$

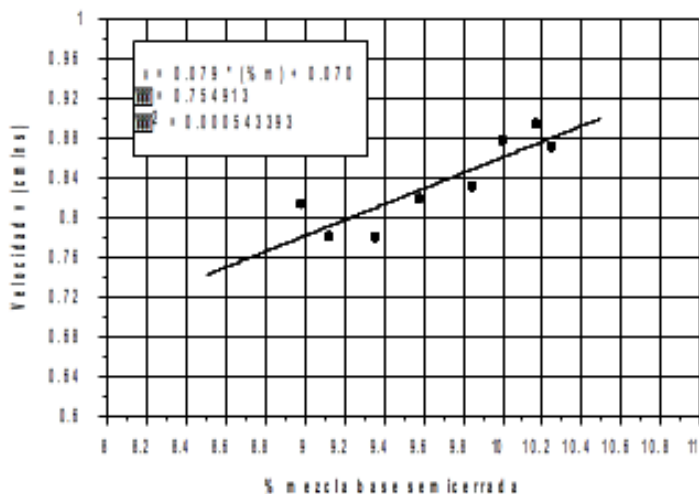


Figura 9: Relación entre la velocidad de propagación (v) y el % de espesor de la base

Por otro lado, si se relaciona la variable velocidad de propagación (v) en función del espesor total medido (h), se observa que la velocidad de propagación tiende a aumentar en el conjunto del sistema a medida que el espesor aumenta. La causa más probable de este efecto es que, a medida que aumenta el espesor del conjunto, también aumenta la proporción de mezclas abiertas o semi-cerradas.

Posiblemente esto se haya producido a consecuencia de la intervención mediante recrido selectivo de la mezcla base de tipo semi-cerrada, realizada en el año 2002, manteniendo la proporción de las mezclas cerradas que forman parte de la capa intermedia y abiertas en el caso de la rodadura.

La representación gráfica de la velocidad (v) en función del espesor medido en los testigos (h), parece mostrar, también en este caso, una relación logarítmica donde, como en el caso anterior, se obtendría una velocidad de propagación estable en el caso de un espesor de mezcla infinita, donde el aporte de una mezcla base de tipo semi-cerrada al conjunto del sistema sería irrelevante. La figura 10 muestra el ajuste realizado. Los puntos se corresponden con los valores experimentales y la curva representada por la ecuación 5 indica la tendencia, obtenida a partir de una regresión.

$$v = 3,815 \ln(h) - 3.324 \quad (5)$$

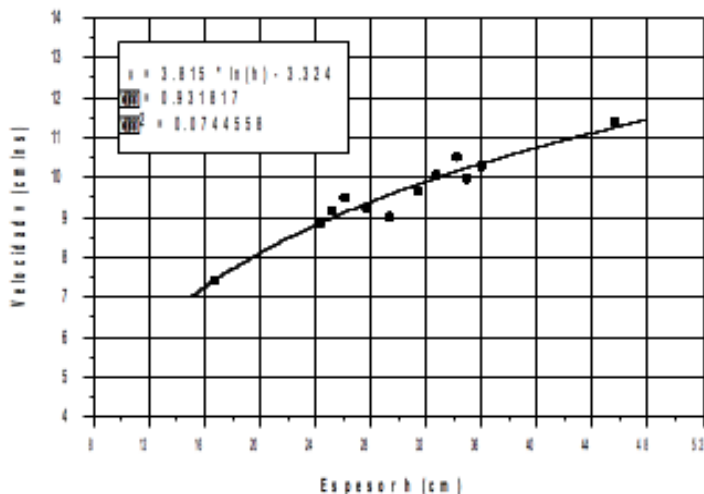


Figura 10. Relación entre espesores (h) y velocidad de propagación (cm/ns).

Finalmente, partiendo de la aplicación de la función logarítmica obtenida mediante regresión, puede obtenerse la velocidad media corregida, v_c , para cada intervalo de espesor considerado. Estos valores se presentan en la tabla 5.

Tabla 5. Velocidades corregidas, v_c , según la aplicación de la relación logarítmica obtenida para el firme de la carretera C-2 (ecuación 5).

h (cm)	V_c (cm/ns)
20	8,10
25	8,96
30	9,65
35	10,24
40	10,75
Δh (cm)	ΔV_c (cm/ns)
20	2,65

De la observación de la tabla se deduce que la diferencia entre los umbrales extremos corresponde a una reducción de velocidad de propagación de 2,65 cm/ns en un diferencial de espesor de 20 cm. Esto indicaría que, en este firme rehabilitado parcialmente mediante la incorporación de mezclas semi-cerradas, el incremento en el porcentaje de uso de dichas mezclas respecto del total ha provocado un incremento de velocidad de propagación entorno al 13,3%.

5. Discusión y conclusiones

Al comparar las velocidades de propagación de la onda electromagnética asociados con cada espesor en las dos carreteras (tablas 4 y 5), puede observarse que el incremento de la velocidad de propagación de onda para el mismo intervalo de tiempo de reflexión de onda es del orden del 15% superior en el caso de la carretera C-2, cuyo firme sufrió un importante proceso de rehabilitación por fallo en la explanada.

Este incremento de la velocidad no parece poder explicarse únicamente a partir del número de huecos presentes en la mezcla bituminosa semi-cerrada utilizada como capa de aporte estructural. Dicho fenómeno podría ser atribuido a la mayor presencia de huecos no indeseados dado el deficiente estado de integridad de las capas de mezcla bituminosa halladas bajo el espesor de recimiento.

Como conclusiones específicas aplicadas a casos similares se pueden considerar:

En un firme en buen estado de conservación y sin haber sufrido procesos de rehabilitación importantes, la relación porcentual de oquedades presentes en una mezcla bituminosa es debida únicamente a su sección constructiva, observándose que la velocidad de propagación de la onda aumenta de forma discreta y proporcionalmente con la presencia de mezclas en el firme con un mayor número de oquedades.

Para testigos con deflexiones altas, es necesario realizar un análisis de los cuencos de deflexiones obtenidos mediante FWD, dado que no es posible deducir, únicamente a partir de la velocidad de propagación de una onda, el origen del fallo.

Por tanto, en un firme sometido a actuaciones de rehabilitación, la velocidad de propagación de la onda puede ser más elevada en las zonas donde se haya producido un mayor daño estructural. Dicho efecto podría ser debido a la presencia de huecos indeseados en las mezclas dañadas bajo las capas de recimiento. Este extremo deberá ser confirmado mediante un exhaustivo análisis que permita relacionar los valores de deflexión, cuyos datos puedan ser asociados directamente al estado de la mezcla bituminosa, con el espesor y la velocidad de propagación conocida.

6. Referencias

- [1] Perez-Jimenez F., Valdés G., Miró R., Martínez A., Botella R. 2010. Fénix Test: Development of a New Test Procedure for Evaluating Cracking Resistance in Bituminous Mixtures. Transportation Research Record 2181, Bituminous Materials and Mixtures 2010, Volume 3, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Nº 2181, Publisher: Transportation Research Board, Washington, DC 20001 USA, ISSN: 0361-1981, pp. 36-43
- [2] Pérez-Jiménez F., Miró R., Martínez A. 2007. Analysis of the fatigue process in bituminous mixes. Fatigue critical strain. To: Transportation Research Board 86th Annual Meeting . Washington, DC 20001 USA.
- [3] Lorenzo, H., V. Cuéllar, M.C. Hernández. 2001. Close range radar remote sensing of concrete degradation in a textile factory floor. Journal of Applied geophysics 47:327-33.
- [4] Al-Qadi I.L., S. Lahouar. 2005. Measuring layer thicknesses with GPR- theory to practice. Construction and Building Materials 19:763-72.
- [5] Lahouar, S., I.L. Al-Qadi. 2008. Automatic detection of multiple pavement layers from GPR data. NDT & E International 41(2):969-81.
- [6] Scullion T., Walubita F., Leidy J., Liu W. 2009. Application of the Ground Penetrating Radar (GPR) to Perpetual Pavements. Road Materials and Pavements Design. 10:259-286.
- [7] Saarenketo T., Scullion T. 2000. Road evaluation with ground penetrating radar. Journal of Applied Geophysics 43: 119-138.
- [8] Al-Qadi, I.L., S. Lahouar, A. Loulizi. 2001. In-situ measurements of hot-mix asphalt dielectric properties. NDT & E International 34:427-434.
- [9] Loizos A., Plati C. 2007. Accuracy of Pavement Thicknesses Estimation Using Different Ground Penetrating Radar Analysis Approaches. NDT & E International Journal 40(2): 147- 157.
- [10] Lahouar S., Al-Qadi I.L. 2008. Automatic detection of multiple pavement layers from GPR data. NDT & E International 41: 69-81.
- [11] Laurens, S., J.P. Balayssac, J. Rhazi, G. Klysz, G. Arliguie. 2005. Non-destructive evaluation of concrete moisture by GPR: experimental study and direct modeling. Materials and Structures 38:827-832.
- [12] Sass, O., H.A. Viles. 2005. How wet are these walls? Testing a novel technique for measuring moisture in ruined walls. Journal of Cultural Heritage 7:257-263.
- [13] Klysz, G., J.-P. Balayssac. 2007. Determination of volumetric water content of concrete using ground-penetrating radar. Cement and concrete research 37:1164-1171.
- [14] Dérobert, X., J. laquinta, G. Klysz, J. Balayssac. 2008. Use of capacitive and GPR techniques for the non-destructive evaluation of cover concrete. NDT&E International 41:44-52.
- [15] Kofman, L., A. Ronen, S. Fridman. 2006. Detection of model voids by identifying reverberation phenomena in GPR records. Journal of Applied geophysics 59:284-299.
- [16] Perez-Gracia, V., R. González-Drigo, D. Di Capua. 2008. Horizontal resolution in a non-destructive shallow GPR survey: An experimental evaluation. NDT & E International 41:611-620.
- [17] Rial, F., M. Pereira, H. Lorenzo, P. Arias, A. Novo. 2009. Resolution of GPR bowtie antennas: An experimental approach. Journal of Applied geophysics 67:367-373.
- [18] Perez-Gracia, V., D. Di Capua, R. González-Drigo, L.G. Pujades. 2009. Laboratory characterization of a GPR antenna for high-resolution testing: Radiation pattern and vertical resolution. NDT & E International 49: 336-344.
- [19] Lorenzo H., Cuéllar V., Hernández M.C. 2001. Close range radar remote sensing of concrete degradation in a textile factory floor. Journal of Applied Geophysics 47: 327-336.
- [20] Benedetto, A., S. Pensa. 2006. Indirect diagnosis of pavement structural damages using surface GPR reflection techniques. Journal of Applied geophysics 62:107-123.
- [21] Annan, A.P. 2002. GPR-history, trends, and future developments. Subsurface Sensing Technologies and Applications 3(4):253-270.
- [22] Daniels, D. 1998. Ground Penetrating Radar. 2nd ed. London, UK: IEE. 723p
- [23] Al-Qadi L., Lahouar S., Loulizi A. 2003. GPR: From the state of art to the state of the practice. Proceedings of International Symposium on Non-destructive testing in civil engineering (NDT-CE). September 16-19, 2003, Berlin, Germany.
- [24] Lorenzo H. 1993. Prospección geofísica de alta resolución mediante geo-radar. Aplicación a obras civiles. Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid.