

IAG136-07-2013
DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DEL GEORADAR, GPR,
DENTRO DE LOS PROCEDIMIENTOS EMPLEADOS PARA EL
ANÁLISIS DE LA RED VIAL NACIONAL

Roy Barrantes Jiménez
LanammeUCR
San José, Costa Rica
Roy.barrantes@ucr.ac.cr

Susana Valverde Masís
LanammeUCR
San José, Costa Rica
Susana.valverdemasis@ucr.ac.cr

Gustavo Badilla Vargas
LanammeUCR
San José, Costa Rica
Gustavo.badilla@ucr.ac.cr

Luis Guillermo Loría Salazar
LanammeUCR
San José, Costa Rica
Luis.loria@ucr.ac.cr

RESUMEN

En Costa Rica existe un deficiente manejo de material de referencia en cuanto a registros de diseños de los paquetes estructurales de los pavimentos de la Red Vial Nacional, ya sea porque muchos de estos documentos son muy antiguos, no existe información disponible o bien, muchos documentos han sido extraviados, por lo que la búsqueda de detalles específicos de espesores de capas es indeterminable.

Actualmente, la obtención de espesores de un paquete estructural ubicado en un tramo en el que se desee realizar un análisis del estado de la Red Vial Nacional requiere de una serie de ensayos destructivos como núcleos y calicatas, estos ensayos además de brindar resultados muy puntuales y que requieren de una cantidad importante de tiempo y recursos, son poco eficientes, riesgosos y reducen la vida útil del pavimento, al convertirse en puntos de falla de la estructura. Caso contrario, el uso de sistemas del Georadar de Penetración, GPR, es un procedimiento no destructivo que proporciona los mismos resultados de una manera más eficiente y eficaz, por medio de la toma y recepción de medidas a partir de pulsos electromagnéticos de corta duración, los cuales ayudaran a determinar patrones para los distintos materiales que componen el paquete estructural de manera que se logre calcular el espesor de las capas.

El análisis realizado sirve al propósito de verificar la correcta colocación y compactación de la mezcla asfáltica y la composición del paquete estructural de cada sección de carretera, adicionalmente, se recurre a la colocación de placas de cobre (material perfectamente reflector de ondas electromagnéticas) en las diferentes interfaces del pavimento durante su construcción. Este proyecto es impulsado por la unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional del Programa de Infraestructura en Transporte del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) con el propósito de incorporar este método no destructivo en la evaluación bienal de la Red Vial de Costa Rica.

RESUMO

Em Costa Rica existe uma má manipulação de material de referência sobre registros de desenhos dos embalagens estruturais dos pavimentos da rede rodoviária nacional, isso acontece porque muitos destes documentos são muito antigos, não há nenhuma informação disponível ou bem, muitos documentos foram perdidos, assim a busca por detalhes específicos de espessura de camadas é indeterminável.

Atualmente, a obtenção de espessuras de um embalagem estrutural localizado em um trecho onde se quer levar a cabo uma análise do estado da rede rodoviária nacional requer uma série de ensaios destrutivos como são os núcleos e poços, nestes ensaios, além de proporcionar resultados muito específicos e exigir uma quantidade significativa de tempo e recursos, são ineficientes, arriscados e reduzem a vida útil do pavimento, ao ponto de falha da estrutura. Caso contrário, o uso de sistemas de penetração de solo, GPR, é um procedimento não-destrutivo que proporciona os mesmos resultados de uma maneira mais eficiente e eficaz, através de toma e recepção de medições de pulsos eletromagnéticos de curta duração, os quais ajudam a determinar padrões para os diferentes materiais que compõem o embalagem estrutural de un modo que se pode calcular a espessura das camadas.

A análise dos resultados da informação é verificada pela colocação adequada da mistura e composição de cada seção da estrada, além da colocação de placas de cobre (material perfeitamente reflexivo para ondas eletromagnéticas) nas diferentes interfaces do pavimento durante a construção. Este projeto é conduzido pela unidade de Gestão e Avaliação da Rede Rodoviária Nacional no Programa de Infra-estrutura no Transporte do Laboratório Nacional de Materiais e Modelos Estruturais (LanammeUCR).

INTRODUCCION

En el país se requieren investigaciones y trabajos que permitan optimizar el diagnóstico de los pavimentos existentes, de manera que las condiciones de un proyecto sean más representativas, en materia de caracterización de materiales y funcionamiento estructural.

Se busca implementar el uso de tecnología no destructiva que permita evaluaciones más eficientes y confiables. Por medio de esta publicación se muestra el avance del proyecto que

pretende desarrollar herramientas provechosas para mejorar la gestión de la inversión en el país, así como agilizar procedimientos útiles para el análisis de la Red Vial Nacional y posteriormente cuantificar la pérdida del patrimonio vial y poder recomendar soluciones oportunas relativas al mantenimiento, rehabilitación o reconstrucción de los pavimentos.

La obtención de espesores es un procedimiento que se obtiene de distintas maneras como lo es la consulta del diseño y verificación de colocación de la mezcla, o realizando ensayos de extracción de núcleos o “cielos abiertos” conocidos también como calicatas, estos dos últimos son destructivos y provocan un daño a la estructura al ser utilizados reduciendo la vida útil de la carretera.

La implementación del georadar para obtener espesores en las capas del pavimento evita daños ocasionados por extracción de muestras conservando la condición del pavimento por analizar. Consecuentemente, no requiere de realizar reparaciones en la zona afectada, disminuyendo la duración en la recolección de datos “in situ” economizando recursos.

Este estudio es parte de una serie de proyectos que propone la Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional y la Unidad de Materiales y Pavimentos del Programa de Infraestructura Vial suscrita al LanammeUCR, para crear herramientas que permitan mejorar el modelado de los pavimentos a nivel nacional y crear una concientización por parte de entidades públicas en la gestión de la red vial.

GENERALIDADES. GEORADAR, GPR

Los radares de penetración en tierra (GPR) o georadares, son sistemas electromagnéticos para el estudio no destructivo del subsuelo. Están basados en la radiación, mediante una antena transmisora (denominada usualmente TX) muy próxima al suelo, la cual emite pulso electromagnético de corta duración, el cual consiste en una señal que en la mayoría de los radares es transitoria. El pulso radiado penetra en la tierra donde parte de él se refleja hacia la superficie cada vez que interacciona con un objeto, estructura o cambio en la estratigrafía del terreno, con propiedades electromagnéticas diferentes dependiendo del medio circundante. La señal reflejada es recibida por una antena receptora de las mismas características que la emisora. Esta señal recibida se amplifica, digitaliza y almacenada para posteriormente, mediante un adecuado procesamiento, obtener información de las características, contenido y posibles anomalías del subsuelo. Entre la posible información obtenida de un georadar está la profundidad, orientación, tamaño y forma de objetos enterrados.

Los GPR ofrecen una facilidad para la determinación de espesores en las capas del pavimento. Además puede evaluar las capas de base y subbase de manera continua, lo cual permite contar con una cantidad de datos que no se podrían obtener fácilmente por los métodos tradicionales que involucran grandes cantidades de trabajo mediante gran cantidad de perforaciones.

El equipo adquirido por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales es de la fábrica GSSI en el modelo RoadScan 30. Este modelo utiliza antenas de bocina de aire, permitiendo la recolección de datos a velocidades de autopista y eliminando la necesidad de cierres de carriles.

Se utilizará una antena a una frecuencia de 1GHz para este estudio. La información recolectada será utilizada para determinar las limitaciones del GPR, para evaluar los espesores en un pavimento y para estimar in-situ la constante dieléctrica de distintos tipos de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente, MAC.

El análisis de los resultados de la información son verificados por la correcta colocación de la mezcla y composición de cada sección de carretera, adicionalmente de la colocación de placas de cobre (material perfectamente reflector de ondas electromagnéticas) en las diferentes interfaces del pavimento durante su construcción, este procedimiento es consultado con ingenieros a cargo de tramos en intervención o construcción en distintas zonas de conservación en el territorio nacional. (Ver metodología en este documento)

Puntos importantes y limitaciones acerca de la interpretación de los resultados obtenidos por el GPR se detallan a continuación.

- Las imágenes obtenidas a partir de las señales reflejadas no son fotografías de la estructura de las capas inferiores a la superficie, éstas muestran la amplitud de la señal reflejada por el GPR de las diferentes interfaces con propiedades dieléctricas distintas.
- Los datos obtenidos son muy extensos.
- Las propiedades dieléctricas dependen de la frecuencia utilizada.
- La humedad afecta directamente la obtención de constantes dieléctricas
- Los espesores de capas muy delgadas pueden superponerse entre sí.

Para la calibración del equipo se colocarán placas de cobre en las interfaces de un paquete estructural (detallado en la metodología de este documento), las placas trabajan como material reflectante y permite una mayor eficiencia en la toma de datos de las constantes dieléctricas. Además otra ventaja de la colocación de las placas es que permite la diferenciación de las capas de un pavimento.

El cálculo de los espesores a partir de los datos arrojados por el GPR se describe en la Figura 1, donde se describe el movimiento de la señal arrojada por el GPR hasta la recolección de los impulsos enviados por las interfaces donde aparece el contraste entre las propiedades dieléctricas de cada material y son recibidos por la antena. El tiempo medido entre cada pulso se combina con las constantes dieléctricas para calcular los espesores, esto según las ecuaciones a continuación.

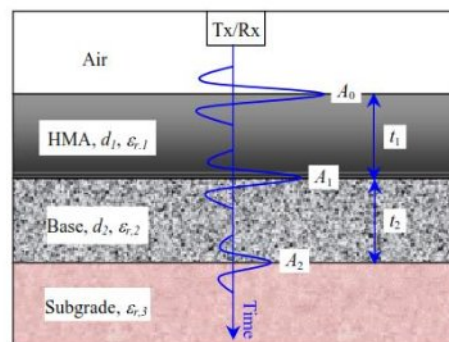


Figura 1. Recolección de datos con el Georadar

Fuente: Ficha técnica Georadar, Road Sacan 30.

$$d_i = \frac{ct_i}{2\sqrt{\epsilon_{r,i}}} \quad \text{ec.1}$$

d_i : es el espesor calculado para cada capa del paquete estructural

c : velocidad de la luz en el vacío

t_i : tiempo tomado entre los impulsos emitidos por cada capa, según la Figura 1

ϵ_i : constantes dieléctricas para cada capa.

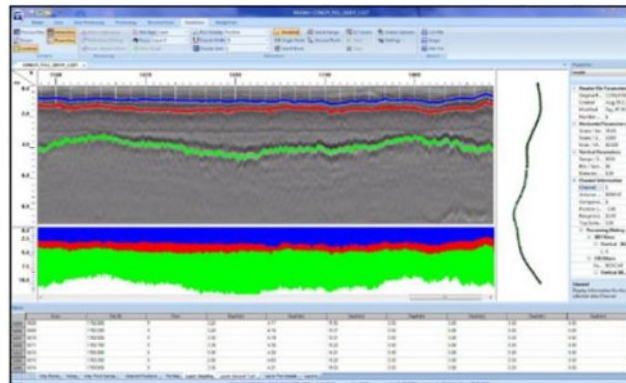


Figura 2.Recolección de datos con el Georadar.

Fuente: Ficha técnica Georadar, Road Sacan 30.

La figura anterior ilustra la capa base (verde) con pavimento original (rojo) y superposición de pavimento (azul).

METODOLOGÍA GENERAL DEL PROYECTO

La selección de tramos para este estudio se limitó a dos tramos en construcción, de manera que fue posible analizar la carretera con espesores de capa conocidos y además que fue posible verificar estos espesores durante la colocación de las distintas capas del paquete estructural.

Se utilizaron datos de deflectometría provenientes del análisis de la Red Vial Nacional de años anteriores para los tramos seleccionados y se realizaron mediciones adicionales de deflectometría para los tramos nuevos.

El principal enfoque de este documento consiste en mostrar el funcionamiento del equipo y evaluar la capacidad del mismo dentro de procesos de evaluación de la Red Vial Nacional; adicionalmente correlacionar los datos obtenidos con otros equipos actualmente utilizados, tales como el Deflectómetro de Impacto. De forma complementaria se realizó un análisis de retrocálculo de módulos para comparar los resultados obtenidos en la determinación de los módulos estructurales de las distintas capas del pavimento usando aproximaciones teóricas de los espesores y por medio de sondeos y extracción de núcleos y los resultados obtenidos con el uso del GPR como metodología más rápida y no destructiva.

Recolección de información de campo

Esta etapa se subdividió en dos fases las cuales se trabajaron paralelamente, primero implementar la verificación del uso del equipo en el laboratorio y mediante pequeños tramos de prueba bajo condiciones controladas, de manera que el uso del equipo resulte manejable para técnicos y personal capacitado. Posteriormente, se procedió a la selección de los tramos “in situ” para realizar las mediciones correspondientes.

Los tramos seleccionados corresponden a un pavimento nuevo con un diseño conocido, (con espesores conocidos) donde existe la posibilidad de verificar los espesores colocados contra el diseño, y adicionalmente se eligió un tramo nuevo en construcción, donde se colocaron una serie de láminas o placas metálicas de cobre entre las capas del paquete estructural, de manera que para el uso del Georadar, los resultados obtenidos sean más evidentes para el analista.

La segunda etapa, es la selección de tramos ya existentes con un período de tiempo de construcción que oscile entre dos y diez años, donde exista la posibilidad de que la carretera haya sido intervenida con una sobrecapa, de esta manera, se podrá determinar la capacidad del Georadar para discriminar entre capas de un mismo material pero donde ya existe una diferencia de módulos evidente producto del envejecimiento, efecto climático o fatiga.

Para ambas situaciones mencionadas, se realizarán muestreos tanto de núcleos como calicatas o cielo abierto, para proceder a una caracterización completa de los materiales propios de los tramos seleccionados y una verificación directa adicional de los espesores colocados.

Comparación de módulos obtenidos a partir de espesores provenientes de muestreo y de mediciones con el GPR.

Posterior a los cálculos de módulos obtenidos a partir de espesores provenientes de muestreo y de mediciones con el GPR, se procedió a comparar los resultados con la expectativa de obtener una similitud en los logros, para determinar la efectividad del equipo versus la obtención de espesores por medio de perforaciones convencionales.

LOGROS Y RESULTADOS

Para todos los tipos de pavimentos analizados se colocaron placas de cobre en ciertos puntos de la estructura del pavimento.

Las placas de cobre colocadas en los proyectos poseen dimensiones de 60 centímetros de ancho y dos metros de largo, así como un espesor de un milímetro. Las placas son colocadas transversalmente en el carril de desaceleración, con un espaciamiento variable según el proyecto donde se ubiquen y en las zonas de interface entre un material y otro, por ejemplo entre la capa de base y la capa de sub-base.

Para el análisis de resultados para este documento se enfatizará en los resultados obtenidos en un proyecto en particular, que corresponde a un pavimento con una sobrecapa asfáltica de 12 cm, sobre la ruta 122 en el cantón de San Rafael de la provincia de Alajuela. Los trabajos consistieron en una rehabilitación de la ruta, donde se colocó base estabilizada con cemento hidráulico y una carpeta asfáltica de 12 centímetros de espesor.

En este proyecto se colocaron tres placas de cobre con un espaciamiento de 25 metros entre cada una, al nivel de la base de la carpeta asfáltica, esto con la finalidad de ubicar fácilmente el límite entre la carpeta asfáltica y la base estabilizada.



Figura 3. Instrumentación del tramo R122

Fuente: Valverde, 2012.

Una vez instrumentado el tramo y abierto el paso por la carretera. Se procedió al análisis de la ruta, tanto con mediciones con el Radar de Penetración, GPR, como deflectometría de impacto por medio de FWD.

En cuanto a las mediciones con el GPR, el equipo fue capaz de tomar mediciones de la estructura del pavimento a velocidades máximas de 86 km/h, por lo que por lo general se ajusta a 420 escaneos por segundo.

La Figura 4 muestra la medición de la estructura del pavimento. Los resultados obtenidos evidencian una clara reflexión producto de las placas de cobre. Estas se pueden observar en las cotas 305, 330 y 355 en la Figura 4. Las placas crean una parábola en la señal recolectada y además se percibe una reflexión a una profundidad mayor.

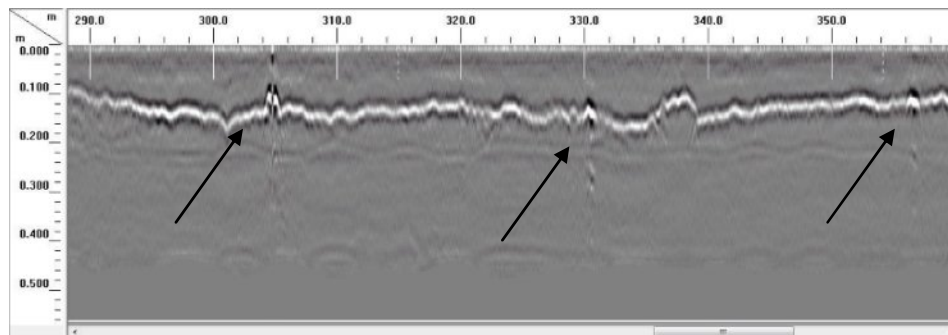


Figura 4. Placas de cobre mostradas en el sondeo con GPR

Fuente: Valverde, 2013.

Posteriormente, con la ayuda del software utilizado para el análisis de la señal emitida por el equipo, se obtienen espesores para la estructura en análisis, esto para la carpeta asfáltica y capas a profundidades mayores.

Según las lecturas del GPR, se obtiene una variación en los espesores a la carpeta en el tramo de análisis, el cual es de 700 metros de longitud. El espesor se mantiene oscilando entre los 10 cm y 11 cm, sin embargo posee valores extremos de 8 cm y 14 cm.

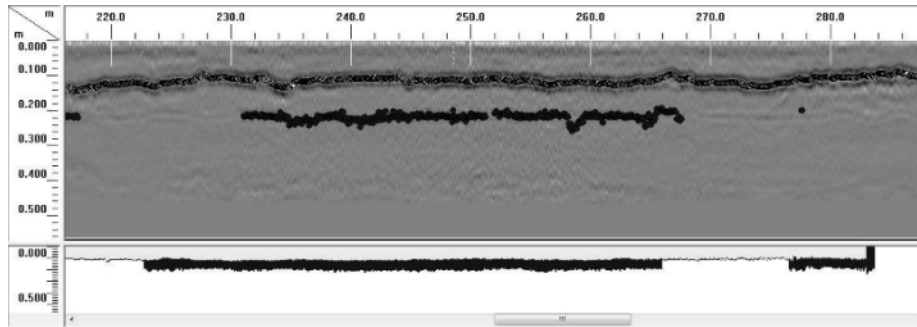


Figura 5. Determinación de espesores utilizando el software

Fuente: Valverde, 2013.

El espesor encontrado para el material correspondiente a una base mejorada con cemento hidráulico, con un espesor promedio de 21 cm. En cuanto a la base granular y la subbase granular la medición del equipo no permite diferenciar adecuadamente ambos materiales y es interpretada como un mismo material. Adicionalmente, las antenas utilizadas emiten una frecuencia de 2GHz y 1 GHz, al tener un alcance de 50 cm y 1 metro respectivamente, la primera no permite una visualización exacta de las condiciones a profundidad debido a su poco alcance y la segunda no permite visualizar el punto de unión entre la subbase y el material de subrasante, debido a que a pesar de que poseer un alcance de profundidad mayor, pierde capacidad de resolución, por lo que este valor es estimado para un espesor de 40 cm.

La estructura colocada posee un diseño de 5 capas, una combinación de carpeta de mezcla asfáltica en caliente, una base mejorada con cemento, base granular, subbase granular y subrasante.

Como un ejemplo de lo obtenido a partir de las mediciones con el GPR, se muestra a continuación un análisis estadístico para los espesores de la carpeta asfáltica. Esto analizado en un tramo de 430 metros.

Tabla 1. Análisis estadístico de espesores para la carpeta asfáltica en tramo de estudio

Carpeta Asfáltica	
Desviación estándar	0.013
Promedio (cm)	11.41
Máx. (cm)	18.00
Mín. (cm)	8.30

Tanto para la estructura encontrada como para el perfil de diseño se realiza un retrocálculo de módulos a partir de los datos obtenidos con el Deflectómetro de Impacto y el uso de software, se obtienen los siguientes valores.

Tabla 2. Comparación de módulos obtenidos por retrocálculo para los espesores obtenidos del diseño del tramo y del sondeo con GPR.

Material	Perfil de Diseño		Perfil medición GPR	
	Espesor (cm)	Módulo (Mpa)	Espesor (cm)	Módulo (Mpa)
Carpeta Asfáltica Nueva	11	3696	10	3219
Base Mejorada con Cemento	25	4336	21	3031
Base Granular	11	553	40	483
Subbase Granular	36	134		
Subrasante		62		53

Tabla 3. Comparación de módulos obtenidos

Material	Módulo (MPa)	Módulo (MPa)	Variación en los módulos obtenidos (%)
Carpeta Asfáltica Nueva	3696	3219	13%
Base Mejorada con Cemento	4336	3031	30%
Base Granular	553	483	13%
Subbase Granular	134		n/a
Subrasante	62	53	15%

CONCLUSIONES PREELIMINARES

1. La antena de 2 GHz, posee una resolución buena, por lo que la representación de la carpeta resulta muy detallada. De esta manera, posterior al análisis de las mediciones se concluye que existe una visible variabilidad en los espesores encontrados, esto desde una perspectiva constructiva en el tramo de análisis. El espesor de la carpeta poseen una variabilidad promedio de 2 cm, con sectores cortos con variaciones de hasta 4 cm.
2. Adicionalmente, después de una profundidad mayor a 40 cm se recurre a las mediciones de la antena de 1 GHz, esto debido a que posee un alcance de una profundidad mayor.
3. Con respecto a la medición de los materiales en capas inferiores, estos poseen propiedades similares, por lo que no son detectados por el georadar de manera eficaz. Los resultados obtenidos por la medición se pueden interpretar como un espesor equivalente.

4. A simple vista, tomando en cuenta las capas superiores, resulta sencillo la determinación preliminar de tramos homogéneos ya que se logra ver la variación de la estructura a lo largo de los tramos evaluados.
5. La diferencia encontrada en el retrocálculo de módulos para las distintas capas de los pavimentos evaluados es alta, por lo que la utilización del equipo como única herramienta de sondeo de la estructura del pavimento no resulta conveniente, esto puede implicar un sobrediseño o un subdiseño en la colocación de sobrecapas de refuerzo estructural.

LIMITACIONES

Los resultados preliminares en el proceso de implementación del GPR en la evaluación de redes viales han mostrado algunas limitaciones cuya incidencia se encuentra aún en proceso de valoración.

Podemos mencionar:

1. Las altas variabilidades en los materiales componentes de los paquetes estructurales de los pavimentos presenta dificultades considerables para establecer espesores de capas con altos niveles de confianza.
2. La presencia de materiales con constantes dieléctricas muy similares que se comportan como una misma capa de material, esto para efectos de reconocimiento de los espesores con el GPR puede generar altos niveles de incertidumbre en los cálculos de los espesores y en los retrocálculos de los módulos de las capas.
3. En cuanto a las antenas utilizadas. El alcance en profundidad de la antena que emite una frecuencia de 2 GHz es poca, a pesar de que la resolución de la antena es muy buena se ve limitada por la poca profundidad que permite analizar. Para la antena que emite una frecuencia de 1 GHz, esta posee un alcance de profundidad mayor, sin embargo la resolución y calidad de información recolectada es menor a la otra antena en cuestión.

REFERENCIAS

- LanammeUCR. (2006). Informe de la evaluación de la red vial nacional pavimentada. San Pedro, Costa Rica: LanammeUCR
- AASHTO. (2003). Standard Method of Test for determinig the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials.
- Kentucky Transportation Center. (2002). Ground Penetration Radar, Pavement LAyer Thickness Evaluation. Universidad de Kentucky, Lexington, Kentucky, Estados Unidos.
- LanammeUCR. (2008). Informe de la evaluación de la red vial nacional pavimentada. San Pedro, Costa Rica: LanammeUCR.