

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



**AUSCULTACIÓN, PROCESO E INTERPRETACIÓN DE
DATOS OBTENIDOS POR GEORADAR APLICADO A
ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO Y CASOS DE
GEOTECNIA VIAL**

Trabajo de graduación presentado por Ana Cristina Cifuentes Gálvez para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala

2017

**AUSCULTACIÓN, PROCESO E INTERPRETACIÓN DE
DATOS OBTENIDOS POR GEORADAR APLICADO A
ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO Y CASOS DE
GEOTECNIA VIAL**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



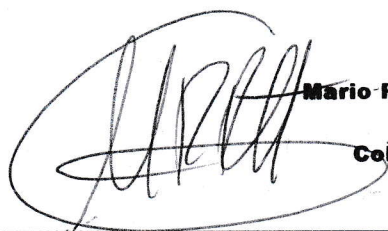
**AUSCULTACIÓN, PROCESO E INTERPRETACIÓN DE
DATOS OBTENIDOS POR GEORADAR APLICADO A
ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO Y CASOS DE
GEOTECNIA VIAL**

Trabajo de graduación presentado por Ana Cristina Cifuentes Gálvez para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala

2017

Vo. Bo. :

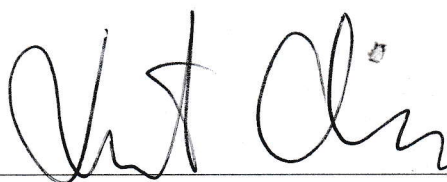


Mario Rodrigo Rubio Haasler
Ingeniero Civil
Colegiado No. 12243

(f)

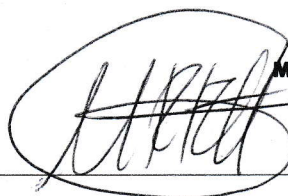
Ing. Mario Rodrigo Rubio Haasler

Tribunal Examinador:



(f)

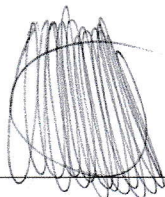
Ing. Roberto Godo Levensen



Mario Rodrigo Rubio Haasler
Ingeniero Civil
Colegiado No. 12243

(f)

Ing. Mario Rodrigo Rubio Haasler



Alvaro Jose Rubio Haasler
Ing. Civil
Colegiado No. 13728

(f)

Ing. Alvaro Rubio Haasler

Fecha de aprobación: Guatemala, 6 de diciembre del 2017

PREFACIO

El deterioro de los pavimentos de una red vial crea la necesidad de evaluar las condiciones en las que se encuentran para poder darles un mantenimiento adecuado y promover programas de administración de vías. El presente trabajo está destinado para aquellas personas interesadas en conocer el funcionamiento de las técnicas no destructivas para la auscultación de estructuras viales. La mayor ventaja de los ensayos no destructivos es una rápida y fácil obtención de datos en campo, sin embargo, la interpretación de los mismos debe ser exhaustiva y realizada por personal capacitado.

El objetivo principal de esta tesis es fomentar el uso del georadar para la evaluación de estructuras de pavimento. Se propone la utilización del mismo complementándolo con otros métodos no destructivos como el Deflectómetro de Impacto y con ensayos destructivos como lo son las extracciones de núcleo. La tesis discute la obtención de datos en campo y la importancia de la interpretación de datos en oficina. Los datos de las mediciones realizadas en este trabajo de graduación son propiedad de la empresa SERPIN, por lo que se le agradece haber permitido la utilización de los mismos en esta investigación. Agradezco también a los ingenieros Rodrigo Rubio y Rodolfo Rubio por compartirme de su conocimiento en todo momento y su ayuda sustancial a lo largo de toda la elaboración de esta tesis. Un especial agradecimiento a mis padres y a mi hermano por el apoyo incondicional durante toda mi carrera profesional.

CONTENIDO

	Página
PREFACIO	iii
LISTA DE CUADROS	vii
LISTA DE FIGURAS	ix
RESUMEN	xix
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	3
A. Generales:	3
B. Específicos:	3
III. TIPOS DE SUELO	4
A. Arcillas	4
B. Arenas	6
C. Limos	7
IV. DEFINICIÓN Y TIPOS DE PAVIMENTOS	8
A. Tipos de pavimentos	8
B. Capas que componen los pavimentos	8
1. Subrasante	8
2. Subbase	8
3. Base	9
4. Capa de rodadura	9
5. Drenaje	9
V. BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS DE ENSAYOS CONVENCIONALES ...	11
A. Granulometría	11
B. Límite líquido y límite plástico	12
C. CBR	12
D. Proctor Modificado	13
E. Ensayo de Penetración Estándar (SPT)	14
F. Calicatas	14

G.	Extracción de núcleos	15
VI.	FACTORES DE ESTUDIO EN PAVIMENTOS	16
A.	Depresiones.....	16
B.	Espesor de capas	16
C.	Contenido de humedad	16
D.	Fisuras y grietas	17
E.	Módulos de resiliencia/elasticidad	17
1.	Pavimentos flexibles	18
2.	Pavimentos rígidos.....	21
F.	Rehabilitación	23
1.	Sobrecarpetas asfálticas	23
2.	Inyecciones de lechada	23
3.	Arreglos menores	23
VII.	TÉCNICA DEL GEORADAR	24
A.	Equipo.....	24
B.	Procedimientos en campo	27
C.	Interpretación de datos	28
D.	Estudio de pavimentos	29
1.	Equipo y métodos utilizados	32
2.	Normas	34
3.	Radargramas	36
a.	Fuerza de reflexión	36
b.	Polaridad de la señal	37
c.	Tiempo de viaje de la onda	38
d.	Reflexión hiperbólica.....	39
e.	Ejemplo.....	40
VIII.	OTRAS APLICACIONES DEL GEORADAR EN INGENIERÍA CIVIL.....	41
IX.	ENSAYO COMPLEMENTARIO: DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO	43
X.	METODOLOGÍA DE TRABAJO PARA MEDICIONES CON EL GEORADAR.....	46
A.	En campo	46

B. En oficina.....	47
XI. ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES EFECTUADAS CON EL GEORADAR Y OTROS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	49
A. Pavimento flexible	49
1.Planta de energía eléctrica	49
2.Autopista Palín-Escuintla.....	60
B. Pavimento rígido	75
XII. CONCLUSIONES	90
XIII. RECOMENDACIONES	92
XIV. BIBLIOGRAFÍA	94
XV. GLOSARIO	98

LISTA DE CUADROS

Cuadro No. 1. Consistencia de las arcillas según su contenido de humedad.....	4
Cuadro No. 2. Clasificación de suelos según valores de CBR.....	13
Cuadro No. 3. Valores comunes de módulos de elasticidad para materiales de pavimentos.....	22
Cuadro No. 4. Valores usuales de módulos de resiliencia, valores de reacción (K) y otras características de materiales utilizados en pavimentos para subrasantes o bases.	22
Cuadro No. 5. Filtros del programa Reflex y sus respectivas funciones.	26
Cuadro No. 6. Propiedades electromagnéticas de materiales comúnmente utilizados en pavimentos.....	33
Cuadro No. 7. Interpretación del comportamiento de un pavimento según su área del cuenco de deflexiones y su deflexión máxima.....	44
Cuadro No. 8. Rangos esperados de ACD según el tipo de pavimento.	44
Cuadro No. 9. Deflexiones máximas de la carpeta asfáltica según el diseño de tránsito.	45
Cuadro No. 10. Espesores de carpeta obtenidos por medio de la extracción de núcleos y por el georadar.	51
Cuadro No. 11. Espesores de carpeta y de base para los diferentes tramos homogéneos de las vías.....	56
Cuadro No. 12. Promedio de deflexiones y áreas de cuenco de deflexiones para cada vía y su correspondiente interpretación.....	57
Cuadro No. 13. Valores mínimos de módulos resilientes de la subrasante y la carpeta asfáltica para cada vía.	58
Cuadro No. 14. Valores obtenidos de Módulo de pavimento.	59
Cuadro No. 15. Valores de números estructurales para cada vía.....	59
Cuadro No. 16. Espesores de capas del carril #7.....	65
Cuadro No. 17. Espesores de capas del carril #8.....	65
Cuadro No. 18. Espesores de capas del carril #10.....	66
Cuadro No. 19. Módulo de resiliencia de la subrasante en tramos homogéneos del carril #7.....	69
Cuadro No. 20. Módulo de pavimento en tramos homogéneos del carril #7.....	70
Cuadro No. 21. Número estructural en tramos homogéneos del carril #7.....	70
Cuadro No. 22. Módulo de resiliencia de la subrasante en tramos homogéneos del carril #8.....	72

Cuadro No. 23. Módulo de pavimento en tramos homogéneos del carril #8.....	72
Cuadro No. 24. Número estructural en tramos homogéneos del carril #8.	72
Cuadro No. 25. Módulo de resiliencia de la subrasante en tramos homogéneos del carril #10...	73
Cuadro No. 26. Módulo de pavimento en tramos homogéneos del carril #10.....	73
Cuadro No. 27. Número estructural en tramos homogéneos del carril #10.	74
Cuadro No. 28. Valores obtenidos para el espesor de la losa de concreto.....	79
Cuadro No. 29. Valores obtenidos para el espesor de la base.....	80
Cuadro No. 30. Módulo de reacción K para la subrasante en ambos carriles.....	84
Cuadro No. 31. Módulo de elasticidad de la losa de concreto para ambos carriles.....	85
Cuadro No. 32. Transferencia de cargas para el carril central.	88
Cuadro No. 33. Transferencia de cargas para el carril derecho.	88

LISTA DE FIGURAS

Figura No. 1. Sección transversal típica de un pavimento.....	10
Figura No. 2. Curva granulométrica	11
Figura No. 3. Relación del número estructural y el módulo de pavimento según el espesor total del pavimento.....	21
Figura No. 4. Proceso de construcción de una vista en 3D.....	28
Figura No. 5. Hipérbola en radargrama que representa una grieta oculta en la base.....	30
Figura No. 6. Radargrama obtenido con la antena acoplada al suelo de frecuencia 2.3 GHz.	31
Figura No. 7. Constantes dieléctricas para evaluaciones de concreto.....	37
Figura No. 8. Ejemplo de vacíos bajo la losa de concreto.	38
Figura No. 9. Ejemplo de migración de radargrama.....	39
Figura No. 10. Radargrama de estudio de losa de concreto y las consecuencias superficiales de las anomalías detectadas.	40
Figura No. 11. Mediciones de deflexiones por medio del deflectómetro de impacto.....	43
Figura No. 12. Componentes básicos de medición del deflectómetro de impacto.	44
Figura No. 13. Ubicación proyecto y tramos analizados.	49
Figura No. 14. Plano de vías analizadas con el georadar.....	50
Figura No. 15. Radargrama obtenido correspondiente al testigo 1.....	51
Figura No. 16. Parte de radargrama de la vía 2, espesor de la carpeta.....	52
Figura No. 17. Parte del radargrama de la vía 4, espesor de carpeta.	53
Figura No. 18. Parte del radargrama de la vía 3, espesor de carpeta.	53
Figura No. 19. Parte del radargrama de la vía 4, espesor de la base.....	54
Figura No. 20. Parte del radargrama de la vía 2, espesor de la base.....	55
Figura No. 21. Ejemplos de tramos homogéneos para la carpeta de la vía 4.....	56
Figura No. 22. Ejemplos de tramos homogéneos para la base de la vía 4.	57
Figura No. 23. Ubicación de carriles analizados en carretera Palín - Escuintla.	61
Figura No. 24. Nomenclatura de carriles utilizada.	62
Figura No. 25. Radargrama utilizado para determinar la fase de la carpeta y su respectiva velocidad de propagación de onda.	63

Figura No. 26. Ejemplo de radargrama obtenido con la antena de 800 MHz.	64
Figura No. 27. Ejemplo de radargrama obtenido con la antena de 500 MHz.	64
Figura No. 28. Ejemplo de los tramos homogéneos para la carpeta del carril #8.	66
Figura No. 29. Migración de finos a la base en carril #7 en tramo km 38+000 al 39+351.	67
Figura No. 30. Irregularidades en carpeta asfáltica por peaje en carril #7 tramo km 40+701 al 43+701.	67
Figura No. 31. Alto contenido de humedad en la base en carril #8 en tramo km 38+000 al 41+073.	68
Figura No. 32. Irregularidades en carpeta asfáltica en el carril #10 tramo km 40+377 al 40+975.	68
Figura No. 33. Irregularidades por peaje.	71
Figura No. 34. Irregularidades por peaje.	71
Figura No. 35. Reparaciones en el carril de ascenso.	74
Figura No. 36. Reparaciones en el carril de ascenso.	75
Figura No. 37. Fallas en pavimento rígido.	77
Figura No. 38. Fallas en pavimento rígido.	76
Figura No. 39. Ubicación de la calle en zona 6, Avenida La Pedrera.	76
Figura No. 40. Nomenclatura de carriles.	77
Figura No. 41. Radargrama obtenido para el carril derecho.	78
Figura No. 42. Ejemplo gráfica para valores del espesor de la losa del carril central.	79
Figura No. 43. Ejemplo gráfica para valores del espesor de la losa del carril derecho.	80
Figura No. 44. Ejemplo gráfica para valores del espesor de la base para el carril central.	81
Figura No. 45. Ejemplo gráfica para valores del espesor de la base para el carril derecho.	81
Figura No. 46. Grietas en la base para el carril central cercanas al metro 200.	82
Figura No. 47. Grietas en la base para el carril derecho cercanas al metro 200.	82
Figura No. 48. Vacío bajo la losa para el carril derecho cercano al metro 400.	83
Figura No. 49. Valores del módulo de elasticidad de la losa de concreto para el carril central.	84
Figura No. 50. Valores del módulo d elasticidad de la losa de concreto para el carril derecho.	85
Figura No. 51. Deflexiones máximas en las esquinas de las losas del carril central.	86
Figura No. 52. Deflexiones máximas en las esquinas de las losas del carril derecho.	87

RESUMEN

El georadar es ampliamente utilizado en evaluaciones de superficies y en diagnosticar factores que afectan la vida útil de los trabajos de ingeniería civil por sus ventajas como: no destruir las estructuras de análisis, su bajo precio a comparación con los métodos tradicionales, su rapidez de adquisición de datos y su confiabilidad y representatividad de las mediciones. El GPR provee información útil, densa y precisa con una alta resolución y disminuye la cantidad de extracciones de núcleos y brinda una visión longitudinal del área de estudio con frecuencias de hasta 0.025 metros.

Los georadares comunes contienen un transmisor y un receptor de ondas electromagnéticas de corta duración. Cada material posee una constante dieléctrica diferente, por lo tanto, cuando existe cualquier cambio en esta constante, la onda electromagnética se refleja, pudiendo así identificar las interfaces entre materiales. Las interfaces pueden ser visualizadas por medio de radargramas, los cuales son imágenes bi-dimensionales y pueden ser vistas tanto en campo como en oficina. Sin embargo, la interpretación de datos formal debe realizarse en oficina con ayuda de programas especiales. En este caso se utilizó el programa ReflexW, el cual tiene a disposición diferentes filtros y opciones para visualizar los espesores de manera fácil y rápida. En esta investigación se aplicaron filtros de ganancia/contraste, de banda, suavizantes, de migración y de reducción para una mejor interpretación. Asimismo, de este programa se exportaron las tablas de los espesores según la distancia recorrida a hojas de cálculo, para crear gráficas y localizar fácilmente los tramos en el que los espesores son menores.

El espesor de las capas del pavimento juega un papel importante en el cálculo de módulos del pavimento, los cuales definen la capacidad del mismo de soportar las cargas del tránsito repetidas veces. El módulo de elasticidad de las capas que constituyen el pavimento, el módulo del pavimento y el número estructural son los factores que dictan el adecuado comportamiento o no del pavimento y en todos ellos, los espesores de las capas son necesarios. Por esta razón, es importante obtener valores representativos de los espesores con el fin de que estos parámetros sean significativos.

En este trabajo se estudiaron los espesores de las capas de pavimento de los proyectos: Planta de energía eléctrica, Autopista Palín-Escuintla y Calle localizada en la zona 6, esto con el fin de evaluar si estos cumplen con el diseño previsto para alcanzar su vida útil respectiva o identificar cualquier agente que afecte su desempeño, como vacíos o migración de finos en la base. Para determinar la velocidad de propagación de onda en los materiales se realizó una calibración de fases por medio de extracciones de

núcleos y calicatas. Además, los resultados del georadar fueron complementados con el ensayo no destructivo del deflectómetro de impacto, esto con el fin de evaluar estructuralmente el pavimento. En los casos que presentaron problemas de deficiencia estructural se procedió a recomendar soluciones viables para rehabilitarlas.

Finalmente, se desea promover la utilización de la técnica del georadar para la evaluación de proyectos viales, calibrando metodologías de medición para la exitosa obtención de radargramas y proveyendo algunas recomendaciones importantes a considerar en la toma e interpretación de datos. Asimismo, se exhorta a estudiar más detalladamente la aplicación del georadar en otros ámbitos de la ingeniería civil, como: la inspección y evaluación de edificios, el estudio del suelo y de las cimentaciones, el análisis de puentes de concreto y mampostería y la detección de obstáculos en el subsuelo.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos 20 años, el desarrollo de la teoría, técnica, tecnología y aplicaciones del georadar ha mostrado un enorme y rápido progreso. El GPR se ha convertido en un método utilizado por científicos, investigadores, ingenieros y estudiantes de universidades pertenecientes a distintas disciplinas. El presente trabajo se enfocará en la función del georadar para diagnosticar elementos de la infraestructura vial como pavimentos, identificando partes dañadas y débiles de los mismos. Además, se utilizará otro ensayo no destructivo (Deflectómetro de Impacto) para complementar la información recolectada por el georadar.

La siguiente tesis empieza con una breve descripción de factores importantes para analizar las estructuras de pavimento como: tipos de suelo y sus características importantes en el ámbito de ingeniería civil, pavimentos flexibles y rígidos y las capas que los componen, ensayos convencionales utilizados para estudiar los materiales que conforman el pavimento y, por último, algunos elementos a examinar que pueden afectar la vida de una estructura de este tipo. Entre estos factores se encuentran: depresiones, espesores de capas, contenido de humedad, fisuras o grietas y módulos de elasticidad de las distintas capas del pavimento. Es importante mencionar que los primeros cuatro pueden identificarse por medio de la información recolectada por el georadar, mientras que el módulo de elasticidad de las capas, se obtiene mediante el deflectómetro de impacto, sin embargo, su cálculo requiere el espesor de capas, los cuales se consiguen gracias al georadar. Si algún pavimento muestra secciones débiles o con daños debe optarse por rehabilitarlos según de la severidad de los daños.

Luego, se expone el funcionamiento de los distintos elementos que conforman el equipo, enfocándose principalmente en las antenas, ya que estas generan y reciben las señales electromagnéticas para crear el radargrama. Además, se presentan otras herramientas complementarias que pueden mejorar la información recolectada por el georadar como: odómetro, GPS, video y programa, el cual en este caso es ReflexW y sus filtros y funciones son explicadas en el presente trabajo.

La técnica del georadar puede dividirse en dos actividades principales: obtención de datos en campo e interpretación de los mismos en oficina. La primera dependerá en gran medida de los objetivos a alcanzar y los factores físicos del terreno; mientras que la actividad en oficina trata de proveer una imagen la más cercana posible al subsuelo analizado. En esta tesis se exponen pasos y factores importantes a considerar, basados en normas y otras literaturas, que pueden servir como una guía para ambas actividades.

Luego de exponer los conceptos de pavimentos y de georadar se prosigue a presentar la aplicación del georadar en el estudio de este tipo de estructuras. Como los pavimentos son estructuras lineales, el georadar representa una opción que brinda perfiles completos de los mismos para poder

analizarlos en su totalidad e identificar las secciones problemáticas. Para estos estudios, este trabajo recomienda el equipo y los métodos a utilizar, los valores de propiedades eléctricas para los materiales comúnmente empleados para pavimentos y algunas normas que regulan estos procedimientos.

A las imágenes obtenidas por el georadar se les denomina radargramas, cuya interpretación necesita conocimiento sobre las características de la imagen. La fuerza de reflexión, la polaridad de la señal, el tiempo de viaje de la onda y las reflexiones hiperbólicas son algunas de las características estudiadas durante la siguiente investigación. Otras características pueden presentarse adicionalmente a las listadas, sin embargo, éstas dependerán de la aplicación que se le dé al georadar. En ingeniería civil, otras aplicaciones que pueden dársele a esta técnica son: inspección y evaluación de edificios, estudio del suelo y de cimentaciones, investigación de puentes y detección de obstáculos en el subsuelo como cables, tuberías y otras construcciones.

En el presente trabajo se analizan tres distintos pavimentos, siendo dos de ellos pavimentos flexibles y uno rígido. Se utiliza una antena de alta frecuencia de 2.3 GHz y una antena apantallada de 500 u 800 MHz, dependiendo del caso. El transporte de las mismas, la resolución de los radargramas y la frecuencia de la toma de datos se eligen según la velocidad a la que pueda transitarse y el largo del tramo a analizar. Para todos los ejemplos se determinan los espesores de las capas y se detectan las anomalías existentes por medio de los radargramas procesados en el programa ReflexW, en el cual se aplican filtros para una mejor visualización. En los pavimentos analizados se realizan extracciones de núcleo o calicatas con el objetivo de determinar la fase que representa cada capa y la velocidad de propagación de los materiales que las conforman. Además, la información del georadar se complementa con el cálculo de parámetros estructurales, como módulos de elasticidad, módulos de pavimento y números estructurales, obtenidos por medio del deflectómetro de impacto. Esto con el fin de ubicar las secciones más débiles y las que requieren de alguna intervención.

II. OBJETIVOS

A. Generales:

- Aplicar la técnica de GPR para el análisis de espesores y anomalías en las capas de estructura de pavimento y subrasante.

B. Específicos:

- Investigar los antecedentes, el funcionamiento y las aplicaciones de la técnica geofísica del georadar.
- Evaluar las propiedades geotécnicas y geofísicas de los materiales y suelos naturales de Guatemala por medio de ensayos no destructivos.
- Estudiar técnicas de intervención para rehabilitaciones de estructuras de pavimento.
- Calibrar metodologías de medición y obtención de perfiles.
- Procesar los datos crudos de proyectos reales en el programa ReflexW.
- Complementar los resultados obtenidos por el georadar con otros ensayos no destructivos.
- Promover la utilización del georadar para la evaluación de proyectos viales.

III. TIPOS DE SUELO

A. Arcillas

El término arcilla se refiere a un material natural, terroso, de tamaño de grano fino y que se comporta plásticamente cuando es mezclado con agua. El tamaño de sus partículas que la constituyen es inferior a 4 micrómetros. (Boardman, 2001)

Siempre ha existido necesidad de evaluar las arcillas para proyectos de ingeniería civil con el fin de conocer sus propiedades geotécnicas. El comportamiento de las arcillas depende de la distribución de tamaños de las partículas que la constituyan, su mineralogía y su contenido de humedad, este último factor, es el más determinante y el comportamiento de un suelo arcilloso es el siguiente: (Reeves, 2006)

Cuadro No. 1. Consistencia de las arcillas según su contenido de humedad.

Contenido de Humedad	Consistencia
Alto (mayor que el límite líquido)	Acuosa o incluso líquida
Entre el límite líquido y plástico	Sólido plástico (usualmente en estado de suelos ingenieriles)
Bajo (menor que el límite plástico)	Sólido sin plasticidad o completamente sólido

Fuente: Reeves, 2006

Los minerales pequeños de las arcillas y sus propiedades tienen características básicas siguientes:

- Los minerales junto con otros constituyentes forman suspensiones coloidales en agua y tienden a fluir.
- Las arcillas se deforman plásticamente con un contenido de humedad específico, tal que una deformación brusca puede ocurrir sin romperse y regresar a su estado original después de que el esfuerzo que la causa sea retirado.
- Los suelos arcillosos tienen una baja permeabilidad y pueden mantener altas presiones negativas del agua de los poros (succiones).
- Algunas arcillas pueden expandirse o contraerse con los cambios de contenido de humedad. Aumentos en el contenido de humedad causan que las partículas se hinchen y disminuciones que se encojan.
- Las rocas formadas de lodo tienden a experimentar una ruptura rápida cuando se someten a procesos de degradación o desgaste. (Reeves, 2006)

Algunos tipos de suelos arcillosos pueden ocasionar dificultades en obras de construcción o durante su explotación si su comportamiento no es anticipado. Los principales y más usuales problemas son los siguientes:

- Expansión o contracción de las partículas:

Todas las arcillas son susceptibles a encogerse o expandirse cuando existen cambios de contenido de humedad. Aunque estos cambios volumétricos son independientes de la carga, ésta restringe el grado de expansión del suelo, generando así presión. Estos problemas son más serios en regiones que experimentan temporadas húmedas y secas alternas.

Por la presencia de minerales expandibles en las arcillas, en regiones tropicales muchos suelos arcillosos de media y alta plasticidad están sujetos a este comportamiento, ocasionando altas presiones en áreas en donde los suelos tengan restricciones generadas por cargas. Estas altas presiones ocurren en la época húmeda y pueden dar lugar a fallas en las estructuras que se encuentran arriba de ellas y a generar movimientos bruscos al momento de encogerse. Para reducir significativamente estos efectos, los suelos arcillosos pueden compactarse a densidades bajas con contenidos de humedad óptimos. Otra solución puede ser estabilizarlos con limo o cemento.

Las arcillas con mayor porosidad tienden a expandirse menos que suelos con baja porosidad y las arcillas dispersas tienden a expandirse menos que las aglutinadas. (Reeves, 2006)

- Dispersión rápida:

Ocurre cuando las fuerzas repulsivas entre las partículas de un suelo arcilloso exceden las fuerzas de atracción, lo cual genera la separación y dispersión de las mismas. En suelos no dispersivos existe un límite de velocidad bajo la cual el flujo de agua no causa erosión y las partículas no son suspendidas. Sin embargo, para suelos como las arcillas, sus partículas se suspenden inclusive en aguas quietas, por lo tanto, estos materiales son altamente susceptibles a la erosión. El factor químico principal que contribuye a la dispersión en un suelo es el sodio.

Este tipo de arcillas pueden tratarse con limos hidratados, cenizas de combustible pulverizado, yeso o sulfato de aluminio para mejorar sus propiedades y utilizarlas en algunas construcciones. (Reeves, 2006)

- Colapso estructural:

El tipo de suelos que ocasiona este problema son altamente porosos y tienen baja densidad. Estas arcillas pueden soportar grandes esfuerzos cuando están parcialmente

saturadas, sin embargo, experimentan una disminución en volumen por el colapso de la estructura del suelo húmedo, incluso bajo pequeños esfuerzos. Usualmente, estos suelos reaccionan al aumento de humedad con colapsar bajo la influencia de las sobrecargas, ya que tienen alto volumen de poros que cuando se saturan superan el límite líquido. Con su contenido de humedad natural, las partículas de estos suelos aparentan tener cohesión, pero ésta se pierde cuando el contenido de humedad aumenta.

Varios métodos de estabilización son utilizados, incluyendo el incremento de la densidad mediante la compactación y las inyecciones de lechada. (Reeves, 2006)

- Arcillas rápidas:

Este tipo de arcillas son extremadamente sensibles, ya que pueden licuarse y fluir como un líquido si éstas son sometidas a pequeños disturbios. La mayoría de estas arcillas están compuestas predominantemente por partículas menores a 0.002 micrómetros y contienen grandes proporciones de cuarzo. Éstos poseen altas porosidades y contenidos de humedad.

Estos suelos están relacionados con varios problemas serios de ingeniería, incluyendo capacidad de carga baja y alta compresibilidad. (Reeves, 2006)

B. Arenas

Las arenas están compuestas por partículas gruesas que pasan el tamiz No. 4 y quedan retenidas en el No. 200. Su comportamiento desde el punto de vista ingenieril es mecánico y no plástico, exceptuando la capilaridad del agua de los poros y presión de poro en estado saturado. Es importante mencionar que agregarle finos a estos suelos (del 10 al 50%) puede mejorar este comportamiento. (Ahlvin, 1988)

La fricción entre dos superficies se expresa con un coeficiente de fricción, el cual dependerá de las características de las superficies en contacto. La fricción interna entre las partículas de la arena es denominada “ángulo interno de fricción”, cuya tangente es equivalente a un coeficiente de fricción. Estos ángulos para suelos arenosos son menores a 30° para partículas redondas, finas y del mismo tamaño y mayor a 40° para partículas gruesas y de diferentes tamaños. A pesar de que las arenas sin confinar, sueltas y con pocos finos no tienen estabilidad, pueden llegar a tener buena estabilidad y ser resistentes a fuerzas de corte si éstas se confinan de manera adecuada. Este

confinamiento dependerá del ángulo de fricción, la forma de las partículas y la distribución de diferentes tamaños de partículas. (Ahlvín, 1988)

C. Limos

Los limos están compuestos por partículas muy finas para ser consideradas arena y muy gruesas para ser arcillas. Algunos sistemas de clasificación separan los limos de las arcillas por el tamiz 0.002 milímetros y por sus características plásticas. Los limos son considerados no tan fuertes como arenas confinadas pero más fuertes que la arcilla. Este tipo de suelos están entre las arcillas y las arenas, por lo que se consideran peligrosos, pues su comportamiento es inesperado y en ciertas circunstancias pueden perder drásticamente su resistencia. Por el tamaño de partícula de estos suelos y el espacio de poro entre ellas, éstos responden rápidamente a los cambios de humedad. (Ahlvín, 1988)

IV. DEFINICIÓN Y TIPOS DE PAVIMENTOS

Es la superficie de rodamiento para todo tipo de vehículos, la cual se compone de capas de diferentes materiales encargados a distribuir y transmitir las cargas aplicadas por el tránsito. Todo pavimento debe soportar el desgaste producido por el tránsito y por el clima, mantener una superficie segura para el rodamiento de los vehículos y conservar un grado de flexibilidad para cubrir los asentamientos que se produzcan.

A. Tipos de pavimentos

- Flexibles: comúnmente están compuestos por tres capas: subbase, base y carpeta asfáltica.
- Rígidos: usualmente están conformados por dos capas: subbase y losa de concreto hidráulico. Esta última le brinda una alta resistencia a la flexión. Este tipo de pavimentos se ven afectados por los esfuerzos de expansión o contracción ocasionados por el cambio de temperatura. (Gutiérrez, 2004)

Las aplicaciones del GPR en infraestructura vial son básicamente estudios para: el diseño de nuevos pavimentos, la rehabilitación de pavimentos existentes, el control de calidad en proyectos viales y para sistemas de administración para pavimentos y otros propósitos similares. Estos estudios pueden brindar información correspondiente a los suelos por debajo de la carpeta, contenidos de humedad y otras características de interés sobre este tipo de proyectos. (Jol, 2009)

B. Capas que componen los pavimentos

1. **Subrasante**: capa de terreno natural que es el apoyo a la estructura de pavimento. Debe ser estudiada en función de sus cambios volumétricos y presencia de material orgánico.

2. **Subbase**: capa que se encuentra entre la subrasante y la base que consiste en una capa de material granular compactado a su humedad óptima. Sus especificaciones requeridas son menos severas que las de la capa base con respecto a fuerza y plasticidad. Sin embargo, el material que la compone debe de tener mejores propiedades que la subrasante. Por razones económicas, esta puede omitirse si la subrasante es de buena calidad. Además de su principal función como porción estructural del pavimento, la subbase tiene otros objetivos como:

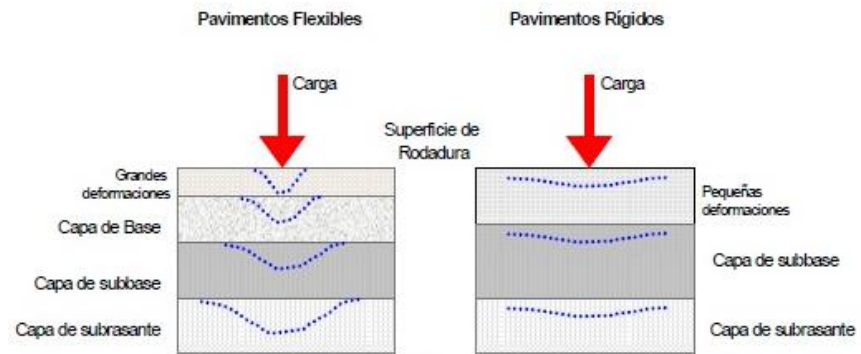
- Prevenir la intrusión de granos finos encontrados en la subrasante a la capa base.
- Evitar la acumulación de agua entre o bajo el pavimento. Debe realizarse provisiones para que se colecte y se remueva el agua acumulada de la subbase.
- Provee una plataforma adecuada para el equipo de construcción.

3. **Base:** se encuentra inmediatamente bajo la capa de rodadura. Su principal función es brindar soporte estructural al pavimento. Esta consiste en agregados como roca y grava triturada, escoria, arena o combinaciones de éstas. Algunas veces puede tratarse con mezclas estabilizadoras adecuadas, como cemento portland, asfalto, limos y puzolana. Al utilizar estas bases estabilizadas se tiene ventajas económicas, pues pueden utilizarse agregados de bajo costo y puede reducirse el espesor de la capa de rodadura.

4. **Capa de rodadura:** es la parte superficial de la estructura de pavimento y sobre ella circula el tránsito. Su principal objetivo es aumentar la capacidad soporte del pavimento, absorbiendo cargas. Además, impermeabiliza la superficie para evitar filtraciones de agua que podrían saturar las capas subyacentes y evita la desintegración de las mismas a causa del tránsito de vehículos. Las capas de rodadura convencionales son: concreto asfáltico, losas de concreto hidráulico y adoquines de concreto.

5. **Drenaje:** es el conjunto de obras que tienen como objetivo remover las aguas superficiales y freáticas indeseables de la estructura de pavimento. Para su diseño deben considerarse los procesos de captación, conducción y evacuación de agua. El exceso de agua en las capas de suelo pertenecientes a las estructuras de pavimento afecta sus propiedades mecánicas, la transferencia de cargas entre capas, las presiones de poro e incrementa la posibilidad de cambios volumétricos. Por lo tanto, el agua es considerada una de las causas más influyentes para el deterioro prematuro de la infraestructura vial. (AASHTO, 1993)

Figura No. 1. Sección transversal típica de un pavimento.



Fuente: Espinosa, 2012

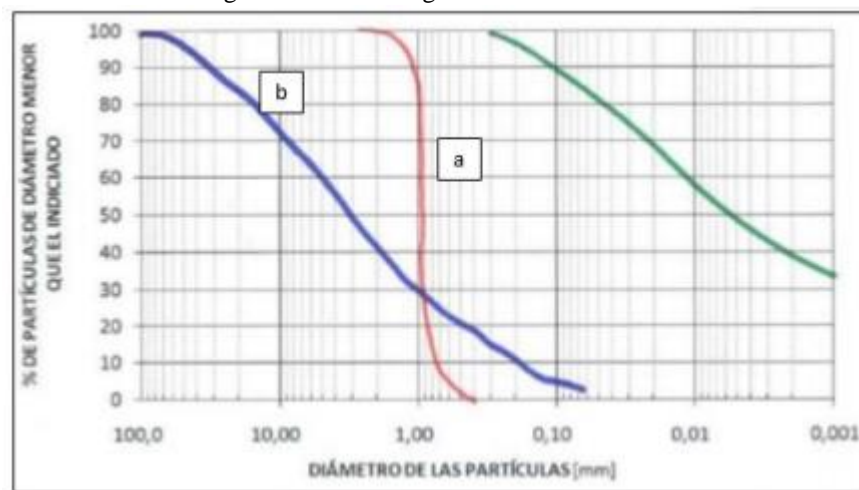
V. BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS DE ENSAYOS CONVENCIONALES

A. Granulometría

Es la determinación del porcentaje, según el peso total de la muestra, de los distintos tamaños de partículas que conforman un suelo. Para conocer la composición granulométrica existen diferentes métodos, el más utilizado es el del tamizado. Al conocer la composición granulométrica del material, se grafican los resultados en la curva granulométrica, la cual muestra en la abscisa la abertura de los tamices a escala logarítmica y en la ordenada el porcentaje de partículas que pasan por dichas mallas a escala aritmética. (Crespo, 2004)

Para los procesos de análisis y clasificación de suelos en proyectos de ingeniería como por ejemplo carreteras, estabilidad de taludes, diques, aeropuertos y túneles es de suma importancia este ensayo, para obtener constantes del suelo como coeficiente de uniformidad y de curvatura, porcentaje de gravas, de arenas y de finos y la clasificación del mismo. En la Figura No. 2 pueden observarse distintas curvas granulométricas en donde la 1.a representa a un suelo homogéneo y 1.b un suelo heterogéneo. En términos de comportamiento, el suelo heterogéneo se comporta de mejor manera que el homogéneo, pues al tener varios tamaños de partículas, éstas pueden acomodarse mejor y crear mayor cohesión entre sí. (Botía, 2015)

Figura No. 2. Curva granulométrica



Fuente: Botía, 2015

B. Límite líquido y límite plástico

El límite líquido es el porcentaje de contenido de humedad del suelo, por debajo del cual el suelo tiene un comportamiento plástico. Cuando los suelos tienen porcentajes de humedad más grandes al límite líquido, su comportamiento será el de un fluido viscoso. Éste se determina por medio de la Copa Casagrande. (Botía, 2015)

El límite plástico se define como la frontera entre el estado plástico y semisólido del suelo. En laboratorio éste es definido como el contenido de humedad que permite que rollitos de aproximadamente 3 milímetros de diámetro empiecen a presentar desmoronamiento y agrietamiento. (Botía, 2015)

Ambos límites son parámetros indispensables para clasificar los suelos y para determinar asentamientos en problemas de consolidación. Además, pueden predecir la máxima densidad en estudios de compactación. (Botía, 2015)

El índice de plasticidad es la diferencia entre el límite líquido y límite plástico. Si éste es bajo, refleja que el suelo se transforma de semisólido a líquido con un pequeño incremento en el contenido de humedad; mientras que si es alto, el suelo necesita gran cantidad de agua para pasar de un estado al otro. (Botía, 2015)

C. CBR

Las siglas CBR se refieren a su significado en inglés “California Bearing Ratio”, el cual es un método de análisis de materiales con el objetivo de clasificar la capacidad del suelo para ser utilizado como material de base o subbase en una estructura de pavimento. Este ensayo también es llamado ensayo de relación de soporte y es el procedimiento mediante el cual puede medirse la resistencia al corte de un suelo utilizando pruebas de laboratorio y condiciones de humedad y densidad controlada. (Botía, 2015)

Este método es utilizado generalmente para estudiar materiales cuyo máximo tamaño de partículas es de $\frac{3}{4}$ de pulgada y en el diseño de pavimentos flexibles para la evaluación de la resistencia potencial de los materiales utilizados en la base y subbase. Además, brinda información sobre la expansión esperada de la subrasante cuando ésta se satura y pierde resistencia. En el Cuadro No. 2 puede observarse una tabla de clasificación general para el suelo según sus valores de CBR. (Botía, 2015)

Cuadro No. 2. Clasificación de suelos según valores de CBR.

Valor CBR	Clasificación general	Usos
0 - 3	Muy pobre	Subrasante
3 - 7	Pobre a regular	Subrasante
7 - 20	Regular	Sub-base
20 - 50	Bueno	Base, subbase
>50	Excelente	Base

Fuente: Botía, 2015

El valor de CBR es la relación de la carga unitaria aplicada al suelo para penetrar un pistón estándar a una velocidad fija con respecto a la carga unitaria patrón requerida para obtener una profundidad igual de penetración en una muestra estándar. (Botía, 2015)

D. Proctor modificado

La compactación es el proceso por medio del cual las partículas que constituyen un suelo son obligadas a juntarse y tener más contacto unas con otras, ocasionando así una reducción en su relación de vacíos. Este proceso en los suelos mejora significativamente sus propiedades ingenieriles como por ejemplo, aumenta su resistencia al corte y su peso específico seco, disminuye su susceptibilidad a deformarse y mejora su condición de permeabilidad. (Botía, 2015)

Este ensayo tiene como objetivo obtener mediante el análisis de la curva de compactación, la relación que hay entre el contenido de humedad del suelo y el peso unitario seco del mismo. Los resultados se grafican en la abscisa el porcentaje de humedad del suelo y la ordenada la densidad seca. El pico más alto de la gráfica es el peso unitario máximo que puede llegar a tener el suelo por medio de métodos de compactación y el porcentaje de humedad respectivo para lograr tal condición. A este porcentaje de humedad se le denomina contenido de humedad óptima. Estos parámetros son de suma importancia en obras de rellenos, terraplenes, rellenos de cimentaciones y capas de bases en pavimentos. (Botía, 2015)

Existe una gran gama de equipos disponibles en la industria para compactar suelos, cuyo uso depende del método que se requiera y las características del suelo a compactar. (Botía, 2015)

E. Ensayo de Penetración Estándar (SPT)

Las siglas SPT se refieren a su significado en inglés “Standard Penetration Test”. Este consiste en introducir un aparato cilíndrico normalizado para tomar muestras. El ensayo brinda el número de golpes necesarios para conseguir enterrar un tubo con el toma-muestras en la punta a una profundidad de 30 centímetros (1 pie). La masa que golpea el tubo pesa 63.5 kilogramos (140 libras) y cae desde una altura de 76 centímetros (30 pulgadas). (González, 2001)

Este tipo de ensayo puede realizarse solamente en suelos arenosos y arcillas blandas, no es recomendable realizarlo en gravas, rocas o arcillas consolidadas, pues el equipo podría sufrir daños al momento de introducirlo a dichos estratos por su alta rigidez. Según el número de golpes obtenidos puede indicarse la consistencia que posee un terreno que desea utilizarse para algún diseño geotécnico. (ASTM, 2011)

Su principal utilidad es la caracterización de los suelos granulares, ya que para este tipo de suelos es muy difícil, o incluso hasta imposible, obtener muestras inalteradas para los ensayos de laboratorio. La frecuencia utilizada usualmente para este ensayo es un intervalo de muestras a cada 2 a 5 metros, o incluso mayor, dependiendo de las características del terreno y la importancia del estudio. (ASTM, 2011)

F. Calicatas

Se define como calicata a la excavación realizada en el suelo, cuya profundidad permite identificar los perfiles de suelo y elaborarles estudios geotécnicos para evaluar sus características en estado natural. Estas extracciones son inspecciones directas del suelo a analizar, por esta razón, la información que entrega es confiable y completa. Las calicatas permiten: investigaciones del terreno *in situ*, tomas de muestra y realizaciones de ensayos en campo. El principal objetivo de las calicatas en el campo de pavimentos es obtener espesores efectivos y determinar los índices de plasticidad de las capas de pavimento y subrasante. (Meza, 2012)

G. Extracción de núcleos

Esta extracción se realiza tanto en pavimentos terminados (rígidos y flexibles) como en obras estructurales (puentes, soleras, muros de contención, etc.). Su principal objetivo es evaluar el cumplimiento de las especificaciones, lo cual asegura la calidad y la duración de las obras realizadas, minimizando así los costos de mantenimiento. La extracción se realiza mediante un dispositivo llamado broca, el cual es de acero, de forma tubular y con una corona de corte diamantada. (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones Paraguay, 2011)

Las muestras de los pavimentos flexibles se utilizan principalmente para determinar si la densidad y el espesor de la carpeta cumplen con las especificaciones de diseño. En algunas ocasiones se destina también para establecer el contenido porcentual de asfalto por medio del ensayo de extracción. Mientras que para las muestras de pavimentos rígidos sirven para verificar el espesor de las losas, determinar sus resistencias y comprobar la calidad final de las mismas. (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones Paraguay, 2011)

VI. FACTORES DE ESTUDIO EN PAVIMENTOS

Se recomienda determinar el estado estructural y las condiciones del material bajo la superficie del pavimento al menos una vez al año e identificar el tipo, la severidad, la magnitud y la causa de cada falla. (Miranda, 2010)

A. Depresiones

Son áreas en la superficie del pavimento con niveles levemente más bajos que sus alrededores. Éstas son formadas por el asentamiento de la subrasante o las capas inferiores a la carpeta. Cuando no se detectan a tiempo, se pueden crear vacíos grandes por el agua almacenada y ocasionar hundimientos, los cuales generan caídas bruscas de nivel. (Corredor, 2010)

B. Espesor de capas

Desde el año 90, el GPR ha ganado popularidad en el ámbito de control de calidad para nuevas vías, el cual se ha basado principalmente en la medición del espesor de capas de la estructura de pavimento y en la determinación de estratigrafía. Las extracciones de núcleos y las calicatas proveen información de los espesores en un punto en específico, mientras que el GPR genera perfiles completos, los cuales brindan una mejor solución para el control de calidad. Para que un diseño de pavimento llegue a cumplir su vida útil prevista es fundamental que éste tenga los espesores de capas dictados en el diseño. (Jol, 2009)

C. Contenido de humedad

La polaridad de la señal está en función de la constante dieléctrica, pues ésta influye en el coeficiente de reflexión, el cual se define por la siguiente ecuación:

Ecuación No. 1. Cálculo de la polaridad de la señal en los radargramas.

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_2} - \sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_2} + \sqrt{\varepsilon_1}}$$

en donde ε_1 y ε_2 son las constantes dieléctricas de los medios. Si este coeficiente es positivo, entonces una amplitud positiva es precedida por una negativa; mientras que si tiene un valor negativo es lo contrario. La polaridad invertida por la inversión de fases ocurre cuando la constante dieléctrica de la capa 1 es mayor que la de la capa 2, lo cual da un coeficiente de reflexión negativo. (Gehrig, 2004)

Por ejemplo, una polaridad negativa ocurriría para vacíos llenos de aire bajo la losa de concreto y para un vacío lleno de agua ocurriría una reflexión positiva. Esto se debe a que la constante dieléctrica del agua es 81, la cual es mucho mayor a las constantes de los demás materiales. Por lo tanto, la humedad se vería en el radargrama como un cambio de polaridad, ya que la presencia de agua aumentaría la constante dieléctrica del material. (Gehrig, 2004)

D. Fisuras y grietas

Están interconectadas con patrones irregulares y se ubican principalmente en zonas en donde se repite la carga. Estas empiezan en el fondo de las capas asfálticas, pues ahí los esfuerzos de tracción son mayores. Las causas de su origen pueden ser: que el espesor de la estructura no es suficiente, por deformaciones de la subrasante, por la oxidación del asfalto a causa del envejecimiento, que el drenaje no sea adecuado y dañe los materiales granulares, por una compactación deficiente de las capas, que la elaboración de la mezcla asfáltica esté defectuosa y/o que las juntas o reparaciones hayan sido mal ejecutadas. (Miranda, 2010)

E. Módulos de resiliencia/elasticidad

Se definen como deformaciones resilientes o elásticas a aquellas que se recuperan su forma original después de la aplicación de una carga; mientras que a aquellas que permanecen en el pavimento después de quitar la carga se le llaman plásticas. Por lo tanto, el módulo de resiliencia o elástico se define como la relación del esfuerzo aplicado repetidamente en compresión triaxial y la deformación axial recuperable.

Este módulo depende del material, del número de aplicaciones y de la magnitud del esfuerzo, método y condiciones de compactación del suelo. Según AASHTO, el módulo resiliente es uno de los parámetros fundamentales para caracterizar los materiales que constituyen un pavimento. Además, reconoce que determinar este módulo para la subrasante ayuda al entendimiento del origen de grietas en las superficies de la carpeta. (Moreno, 2005)

El módulo resiliente es una propiedad fundamental para la caracterización de los suelos. Determinar su valor es costoso y se requiere de mayor tiempo que un ensayo de CBR, sin embargo, es la mejor manera de conocer las propiedades de un suelo ante una carga dinámica. Identificando este valor se aumenta la confiabilidad de diseño y se elimina el carácter empírico de las correlaciones. (Moreno, 2005)

1. Pavimentos flexibles. El método “Washington State Department of Transportation” WSDoT, por sus siglas en inglés, está conformado por varias ecuaciones que utilizan el área del cuenco de deflexiones obtenido por medio del deflectómetro de impacto. Este método fue desarrollado empíricamente para pavimentos con dos capas y tres capas, cuyas relaciones respectivas son $R^2=0.99$ y $R^2=0.7$. Las ecuaciones según Faundez 2011 para los módulos de las diferentes capas se muestran a continuación.

Ecuación No. 2. Módulo de elasticidad del suelo en psi.

$$E_{SG} = -346 + 0.00676 \frac{2P}{D_{90} + D_{120}}$$

Ecuación No. 3. Módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica.

$$\log(E_{AC}) = -4.13164 + 0.25726 \frac{5.9}{h_{AC}} + 0.92874 \sqrt{\frac{5.9}{h_B}} - 0.69727 \sqrt{\frac{h_{AC}}{h_B}} +$$

$$-0.96687 * \log(E_{SG}) + 1.88298 \log\left(\frac{P * A_1}{D_0^2}\right)$$

Ecuación No. 4. Módulo de elasticidad de la base.

$$\log(E_B) = 0.50634 + 0.03474 \frac{5.9}{h_{AC}} + 0.12541 \sqrt{\frac{5.9}{h_B}} - 0.09416 \sqrt{\frac{h_{AC}}{h_B}} +$$

$$+ 0.51386 * \log(E_{SG}) + 0.25424 \log\left(\frac{P * A_1}{D_0^2}\right)$$

En donde:

E_{sg}	:	Módulo de elasticidad del suelo (psi).
E_{ac}	:	Módulo de elasticidad del pavimento asfáltico (psi).
E_B	:	Módulo de elasticidad de la base.
h_{AC}	:	Espesor del pavimento asfáltico (plg).
h_B	:	Espesor de la base (plg).
P	:	Carga aplicada (lbs).
D_0	:	Deflexión en el centro de la carga (plg).
D_{30}	:	Deflexión a 30 cm de la carga (plg).
D_{60}	:	Deflexión a 60 cm de la carga (plg).
D_{90}	:	Deflexión a 90 cm de la carga (plg).
A_1	:	Área aproximada bajo el cuenco de deflexión hasta 90 cm del punto de aplicación de la carga.

(Faúndez, 2011)

El número estructural (SN) es el aporte total necesario para que la subrasante reciba solamente el nivel de esfuerzos que pueda resistir. Cada capa que constituye el pavimento dará un aporte estructural proporcional a su espesor, cuya sumatoria deberá ser mayor o igual al SN necesario. (Bonilla, 2004)

La determinación del número estructural de un pavimento en servicio es de suma utilidad ya que refleja su capacidad o deficiencia con relación a la demanda del tránsito. El valor de SN de diseño dependerá mayormente del tráfico y la capacidad portante de la subrasante. Si se tiene una subrasante con buena capacidad y una demanda de tránsito baja, entonces es necesario un SN bajo. (Del Águila, 2008)

Este SN puede obtenerse por medio de ensayos no destructivos como lo son el georadar y el deflectómetro de impacto. Existen varios métodos que relacionan los parámetros derivados del cuenco de deflexiones, los módulos resilientes y los espesores de las capas. Todos los métodos para el cálculo de SN dependen en gran medida de los espesores del pavimento, por lo tanto, unas cuantas calicatas no son significativas, ya que son puntuales y evaluar en SN con estos valores daría un valor no representativo. Por esta razón, se recomienda el uso del GPR para obtener valores más realistas. (Del Águila, 2008)

La relación entre el espesor de la capa y su rigidez, según AASHTO es la siguiente:

Ecuación No. 5. Relación entre el espesor de la capa y su rigidez.

$$SN_{eff} = 0.0045h_p^3\sqrt{Ep}$$

En donde:

h_p = espesor total del pavimento por encima de la subrasante (in)

E_p = módulo efectivo de las capas del pavimento por encima de la subrasante (psi)

(Del Águila, 2008)

El módulo de pavimento (EP) brinda información sobre los materiales de construcción, como por ejemplo, compactación, humedad y limpieza. Mientras menor sea su valor, menor será el número estructural de pavimento. Este es definido con la siguiente ecuación (AASHTO, 1993):

Ecuación No. 6. Obtención del módulo de pavimento E_p .

$$d_0 = 1.5 * P * a \left[\frac{l}{M_r \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \sqrt{\frac{E_p}{M_r}} \right)^2}} + \frac{\left(1 - \frac{l}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}} \right)}{E_p} \right]$$

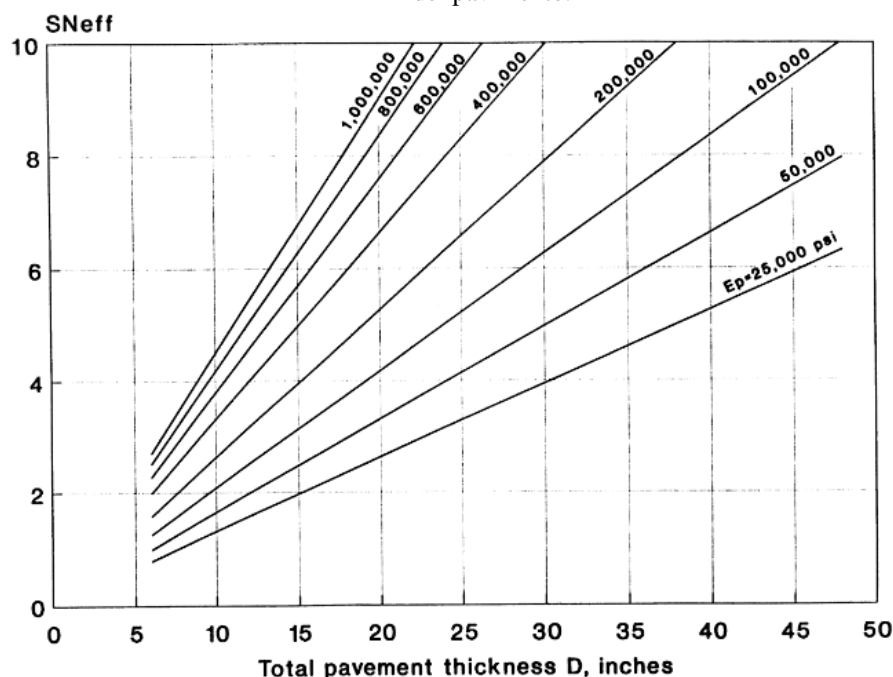
En donde:

d_0 = Deflexión máxima medida en el centro de la placa de carga (in)

q = Presión de la placa de carga (psi)

Por medio de la siguiente gráfica pueden relacionarse los valores de número estructural y módulo de pavimento según el espesor total del pavimento. (AASHTO, 1993)

Figura No. 3. Relación del número estructural y el módulo de pavimento según el espesor total del pavimento.



Fuente: AASHTO, 1993

2. Pavimentos rígidos. El módulo de reacción de la subrasante (K) refleja cuánto se asienta la misma al momento de aplicarle un esfuerzo de compresión y se define como la relación entre la carga en libras sobre un área de carga en pulgadas cuadradas y la deflexión para esa carga en pulgadas. Por lo tanto, los valores de K se expresan como libras por pulgada cúbica (pci). Otro parámetro importante en el estudio de pavimentos rígidos es el módulo de elasticidad de la carpeta de concreto, el cual muestra la rigidez y capacidad de la carpeta de distribuir las cargas solicitadas. Se describe como la relación entre la tensión y la deformación, ya que las deflexiones, curvaturas y tensiones están estrechamente relacionadas con el módulo de elasticidad del concreto. Además, este módulo depende del radio de rigidez, el módulo de reacción estático (K) y del espesor de la carpeta. (AASHTO, 1993)

Cuadro No. 3. Valores comunes de módulos de elasticidad para materiales de pavimentos.

Módulos de elasticidad de materiales típicos para pavimentos		
Material	Rango (kg/cm²)	Típico (kg/cm²)
Concreto hidráulico	200,000-550,000	300,000
Base tratada	30,000-70,000	10,000
Base granular	1,000-3,500	2,000
Subbase granular	800-2,000	1,000

Fuente: Sánchez, 2016

La transferencia de carga en los pavimentos rígidos debe ser eficiente de losa a losa para minimizar las deflexiones en las juntas. Las deflexiones muy grandes pueden generar bombeo de la subbase y posteriormente rotura de la losa de concreto. Esta capacidad es tomada en cuenta como el coeficiente de transferencia de carga J. (AASHTO, 1993)

Cuadro No. 4. Valores usuales de módulos de resiliencia, valores de reacción (K) y otras características de materiales utilizados en pavimentos para subrasantes o bases.

Tipo de suelo AASHTO	Descripción	SUCS	γ_d (kN/m³)	VRS %	Valor K (MPa/m)	Módulo resiliente (MPa)
Suelos de grano grueso						
A-1-a , bien graduado	Grava	GW, GP	19.6-22	60 - 80	81.44-122.16	70.37-140.74
A-1-a , mal graduado			18.9-20.4	35 - 60	81.44-108.58	70.37-140.74
A-1-b	Arena gruesa	SW	17.3-20.4	20 - 40	54.29-108.58	42.23-105.55
A-3	Arena fina	SP	16.518.9	15 - 25	40.72-81.44	35.18-14.07
Suelos A-2 (materiales granulares con alto porcentaje de finos)						
A-2-4 , gravosa	Grava limosa	GM	20.422.8	40 - 80	81.44-135.73	70.37-211.11
A-2-5 , gravosa	Grava areno limosa					
A-2-4 , arenosa	Arena limosa	SM	18.9-21.2	20 - 40	81.44-108.58	70.37-140.74
A-2-5 , arenosa	Arena limosa con grava					
A-2-6 gravosa	Grava arcillosa	GC	18.9-22.0	20 - 40	54.29-122.16	56.29-140.74
A-2-7 gravosa	Grava arcillosa con arena					
A-2-6 arenosa	Arena arcillosa	SC	16.5-20.4	10 - 20	40.72-95.00	35.18-105.55
A-2-7 arenosa	Arena arcillosa con grava					
Suelos de grano fino *						
A-4	Limo	ML , OL	14.1-16.5	4 - 8	6.79-44.79	14.07-42.22
	Grava-arena-limo		15.7-19.6	5 - 15	10.86-59.72	28.14-56.29
A-5	Limo alta compresibilidad	MH	12.6-15.7	4-8	6.79-51.58	14.07-42.22
A-6	Arcilla plástica	CL	15.7-19.6	5-15	6.79-69.22	14.07-70.37
A-7-5	Arcilla baja compresibilidad	CL, OL	14.1-19.6	4-15	6.79-58.36	14.07-70.37
A-7-6	Arcilla alta compresibilidad	CH, OH	12.6-17.3	3-5	10.86-59.73	28.14-70.37

Fuente: Garnica, 2001

F. Rehabilitación

Se trata de la recuperación, refuerzo y/o restauración de los pavimentos deficientes.

1. **Sobrecarpetas asfálticas.** Son utilizadas para corregir las deficiencias de la superficie del pavimento como desprendimiento, asperezas y espesores muy angostos, lo cual puede corregirse por medio de una nivelación de bajo espesor. Además, pueden arreglarse las deficiencias estructurales con sobrecarpetas diseñadas según las propiedades del pavimento y las cargas de tráfico. (Loria, 2014)

2. **Inyecciones de lechada.** Son procedimientos que se aplican al subsuelo, introduciendo en los poros del medio a tratar un producto líquido (mortero o lechada), el cual se solidifica y adquiere una resistencia específica después de un tiempo. Se utilizan cuando existen grandes vacíos bajo losas, ya que el suelo debajo se ha lavado por agua. (Suelos Ingeniería, 2016)

3. **Arreglos menores.** Son acciones aplicadas localmente, como por ejemplo sellado, bacheo, nivelación localizada y texturizado localizado. Se ejecutan para reparar fallas que afectan el nivel de servicio del pavimento y son viables solamente cuando la condición del pavimento no tiene un alto grado de deterioro, pues de otra manera estas acciones se hacen muy costosas y poco efectivas. (Jugo, 2005)

VII. TÉCNICA DEL GEORADAR

El georadar es una técnica no destructiva que brinda imágenes de alta resolución del subsuelo y las estructuras mediante ondas electromagnéticas de banda ancha. Este opera en un rango amplio de frecuencias que van desde 10 MHz a 5 GHz para sistemas de impulsos y de 1 a 8 GHz para sistemas de frecuencias escalonadas. El campo electromagnético emitido por el radar interactúa con el área de estudio y en cualquier interfaz que corresponda un cambio en las propiedades de la constante dieléctrica, la onda se refleja, se transmite y es detectada por la antena receptora. (Benedetto, 2015)

La constante dieléctrica es una propiedad electromagnética, con la cual los materiales como suelos, rocas, concreto y agua pueden ser caracterizados. La velocidad de propagación de una señal electromagnética a través de un material está en función de la constante dieléctrica del mismo y es principalmente influida por el contenido de agua. (Morey, 1998)

A. Equipo

Un sistema típico de GPR se conforma de los siguientes componentes:

- Antena
- Puertos de alta y baja frecuencia
- Procesador de señal (computadora y programa especial)
- Visualización de la imagen escaneada
- Interpretación de datos y programa de procesamiento
- Programa integrado con medición de distancias (DMI), GPS e imágenes digitales

La antena genera la onda de corto pulso, lo cual permite que el radar distinga los pequeños objetos y características bajo la superficie. El receptor de la señal colecta la energía electromagnética en forma de reflexión o eco que ocurre cuando la onda choca con un objeto con diferentes propiedades eléctricas que el medio que lo rodea y luego, la manda al procesador de señal, el cual extrae la información importante. La interpretación de datos se realiza en oficina utilizando un programa especial ReflexW conjunto con imágenes, videos y demás información complementaria que se tenga. (Uddin, 2014) Sin embargo, el georadar cuenta con una pantalla para visualizar la imagen escaneada en campo, la cual contiene algunos filtros para eliminar el ruido y frecuencias que no dejan ubicar el objetivo. Estos datos crudos deben ser utilizados solamente cuando se necesita una interpretación de los datos inmediatamente después de la medición. (Daniels, 2000)

Los GPR pueden ser clasificados en dos categorías dependiendo del tipo de antena: acoplada al suelo y aéreas. La primera debe de estar directamente sobre el suelo y permite mayores profundidades de penetración. (Benedetto, 2016)

Las diferentes antenas son:

- Antenas de alta frecuencia: este tipo de antenas ofrecen imágenes de buena resolución y son utilizadas principalmente para mediciones de alta precisión como inspecciones de estructuras de concreto, ingeniería forense, estudios de vías, determinación de espesores de capas, entre otros. Además, estas brindan una forma confiable y no destructiva de recolectar información sobre lo que se encuentra bajo la superficie de estudio de manera eficiente e incluso en tiempo real. Pueden detectar tanto características metálicas como no metálicas como refuerzos, conductos, cableado, tubería PVC, cables de post tensado, vacíos, etc. En el mercado hay tres antenas de alta frecuencia disponibles: 1.2 GHz, 1.6 GHz y 2.3 GHz, teniendo la primera el mayor rango de penetración y la última el menor. (MALA, 2011) La mayoría de las antenas de alta frecuencia se encuentran blindadas, lo cual reduce la energía de radiación en los lados y en la parte de arriba de la antena. (ASTM, 2011)
- Antenas apantalladas: son utilizadas en áreas urbanas o sitios con mucho ruido de fondo. Estas antenas consisten en elementos tanto de transmisión como de recepción en un mismo aparato. El diseño de las mismas asegura que la energía transmitida del radar se emita solamente en la parte de debajo de la antena, en donde está en contacto con la superficie y protege al receptor de señales externas de otras direcciones. En el mercado se encuentran cuatro antenas blindadas disponibles con las siguientes frecuencias:
 - 100 MHz: para investigaciones de media a baja resolución.
 - 250 MHz: para investigaciones que requieren profundidad y resolución media.
 - 500 MHz: es la más utilizada, pues ofrece buena resolución para bajas y medias profundidades.
 - 800 MHz: para investigaciones de bajas profundidades ofrece alta resolución. (MALA, 2011)

Aparte de las antenas, el equipo cuenta con las siguientes herramientas:

- Odómetro: la carretilla en donde va el equipo del georadar contiene un odómetro, el cual va registrando las distancias recorridas. (MALA, 2011)
- GPS: los datos del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) son utilizados principalmente para posicionar las medidas del GPR correctamente, sin embargo, éstos también ayudan con la interpretación. Si los datos recaudados por el GPR se vinculan con las coordenadas GPS,

el perfil de estudio puede ser enlazado a mapas geológicos, lo cual puede ayudar a verificar la calidad del suelo bajo el pavimento. (Jol, 2009)

- Videos: se consideran fundamentales en el estudio de vías. Esto se debe a que el video muestra los daños superficiales del pavimento y ayuda a identificar los problemas relacionados con el drenaje, lo cual ayuda al interprete a hacer un diagnóstico correcto de los problemas presentes. La mejor opción es vincular el video digital con los datos del GPR. (Jol, 2009)
- Programa Reflex: es un programa para el procesamiento e interpretación de datos obtenidos por medio del georadar, ultrasonido y refracciones y reflexiones sísmicas. Éste cuenta con diferentes filtros que para aplicarlos a los datos crudos y facilitar la interpretación de los mismos. Es importante que la persona que utiliza Reflex tenga conocimiento de los filtros a aplicar, por lo tanto, en la siguiente tabla se muestran los filtros utilizados durante la interpretación de datos. (Sandmeier, 2015)

Cuadro No. 5. Filtros del programa Reflex y sus respectivas funciones.

Nombre de filtro en ReflexW	Descripción
Subtract-mean (dewow)	Se utiliza para eliminar los componentes de baja frecuencia, los cuales son causados por la saturación de la señal por llegadas tempranas de las reflexiones. Este filtro es un paso vital, pues al quitar estos datos se evita que se distorsione el espectro de todo el perfil medido.
Subtract-DC-Shift	Como parámetro deben ingresarse 2 valores de tiempo, dentro de este rango la media es calculada para todos los trazos y la subtrae de los mismos. Por lo tanto, es necesario que el rango de tiempo escogido elimine la tanda que se quiera.
Zero-Time Adjustment	Las derivas térmicas, la inestabilidad electrónica, las diferencias de largo en los cables y variaciones en la distancia de las antenas con la superficie pueden causar desfases en la primera llegada de señal al receptor. Éste debe corregirse al primer pico negativo del perfil con la ayuda de la opción “wigggle window”.
Background removal	Este filtro elimina las líneas horizontales causadas por el ruido, el cual ocurre principalmente en los materiales sueltos.
Gain function	Su principal función es mejorar la visibilidad del radargrama aplicando factores de amplificación. Tanto las señales coherentes como los ruidos son amplificados, por esto, se recomienda eliminarlos previamente.

Fuente: Jol, 2009

La base de la técnica del georadar se basa en la velocidad de las ondas electromagnéticas. En el aire, estas ondas viajan a velocidad de la luz, disminuyendo esta velocidad cuando las ondas viajan a través de cualquier otro medio. Esta velocidad es determinada por la constante dieléctrica característica de cada material. La velocidad de la onda se reduce conforme aumenta esta constante. (Uddin, 2014)

B. Procedimientos en campo

La configuración de los instrumentos y el diseño del estudio son determinados por los objetivos que se quieran alcanzar y los factores físicos del terreno (especialmente la aspereza del suelo y la presencia de obstrucciones como agua, árboles, barrancos, rocas o estructuras hechas por el ser humano). Dependiendo de estos factores se determina de primero la frecuencia de antena apropiada. (Griffin, s/f)

Según la norma ASTM D6432, los objetivos del estudio y las características físicas del terreno regirán no sólo el equipo a utilizar, sino que también el nivel de interpretación e incluso el presupuesto necesario para alcanzar los resultados deseados. Otros factores que recomienda la norma tomar en cuenta son: la profundidad de la investigación, las propiedades electromagnéticas del suelo u objeto, la topografía del terreno, el acceso al sitio, la presencia de fuentes de ruido y las limitaciones operacionales existentes. Una buena práctica es obtener toda la información relevante disponible del sitio antes de movilizarse con el equipo al campo. (ASTM, 2011)

En el sitio de estudio es recomendable realizar una serie de mediciones iniciales para verificar si la frecuencia elegida de la antena es la correcta y establecer los filtros y las configuraciones adecuadas para que el radargrama pueda observarse lo más claro posible en campo. Además, siempre es bueno anotar el equipo, las configuraciones, la ubicación de los perfiles de estudio y los procedimientos operacionales a utilizar en cada proyecto, así como los cambios, condiciones o problemas que vayan surgiendo y puedan influir en los resultados del estudio. (ASTM, 2011)

La resolución lateral de un radargrama depende de la frecuencia de la antena, el intervalo en el cual las señales son recibidas y guardadas y la velocidad en la que la antena se mueve (factores que pueden ser controlados por el operador). Esta se encuentra a lo largo del radargrama (eje x), mientras que la resolución vertical es en el eje y. Esta última puede considerarse como qué tan pequeño puede ser un cambio de profundidad en una capa para que sea determinado por el método del GPR y qué tan fina puede ser una capa para que sea detectada con esta técnica. La resolución vertical entonces, depende de la amplitud y la longitud de la onda transmitida, de las propiedades electromagnéticas del suelo y del ruido en el sitio de estudio. (ASTM, 2011)

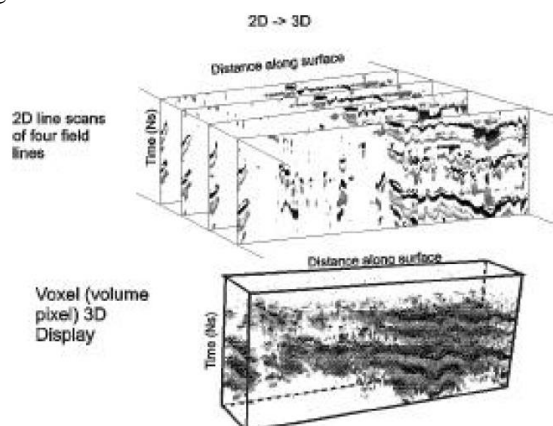
La mayoría de las antenas pueden ser manipuladas fácilmente y el método usual de operación es arrastrar las antenas lentamente a través de la superficie a analizar en líneas rectas, transmitiendo y recibiendo señal continuamente. Las series de ondas todas combinadas forman el mapeo de capas y muestran los objetos en el suelo. Generalmente, la operación de un GPR comercial requiere dos personas, una que arrastre la antena a través de la superficie de estudio y la otra que controle las operaciones de los instrumentos desde una laptop conectada al módulo del georadar. Cuando se requiera, también puede utilizarse automóviles o motocicletas de cuatro ruedas para movilizar el GPR. (Griffin, s/f)

C. Interpretación de datos

El objetivo principal de los datos recolectados mediante GPR es proveer una imagen que se vea lo más cercano posible al subsuelo analizado. La visualización de datos es lo más importante para la interpretación. A estas imágenes se les llama radargramas, las cuales son imágenes bi-dimensionales obtenidas por medio del georadar, en donde las abscisas muestran la distancia cubierta del perfil analizado y las ordenadas el tiempo necesario para que la señal emitida por la antena se refleje y llegue de nuevo a esta. (Geo-radar, 2005)

Hay tres tipos de visualizaciones para los datos, los cuales son: trazo unidimensional, sección transversal en dos dimensiones y visualización en tres dimensiones. Los trazos unidimensionales no son de utilidad hasta que se unen con otros trazos con el fin de formar secciones transversales en dos dimensiones o en visualizaciones en tres dimensiones. Las secciones transversales en dos dimensiones, anteriormente se realizaban en forma de espiral, sin embargo, no era práctico, por lo tanto, se empezaron a hacer estudios en perfiles. Las visualizaciones en tres dimensiones se forman con mediciones tomadas en diferentes posiciones de la superficie en forma de perfiles. Usualmente, estas vistas se construyen de varios perfiles paralelos y cercanos (ver Figura No. 4). (Daniels, 2000)

Figura No. 4. Proceso de construcción de una vista en 3D.



Fuente: Daniels, 2000

La interpretación de resultados puede estar conformada por todos o algunos de los siguientes pasos dependiendo del propósito del estudio:

- Tiempo cero: es necesario ajustar el tiempo cero a donde empieza la superficie de análisis, que es el primer pico positivo en la amplitud de la onda.
- Reconocimiento de ruidos: las señales continuas y horizontales a lo largo de un radargrama indican, generalmente, ruidos, que el sistema está funcionando mal y/o un estrato inusualmente plano. Además, los ruidos que sean causados por factores ambientales, geológicos y culturales pueden causar malentendidos en la interpretación si no se identifican previamente. Éstos pueden ser removidos con la ayuda del programa a utilizar aplicando filtros.
- Reflectores puntuales: se identifican como hipérbolas y pueden ser causadas por tubería, tanques, cimentaciones, cuevas, cavidades y estructuras geológicas verticales.
- Cambios laterales: los cambios en la amplitud de ondas o patrones de reflexión en el radargrama pueden ser generados por cambios en el tipo de suelo o roca y en el contenido de humedad y por la presencia de contaminantes u otros artefactos humanos.
- Integración de información: el tiempo de viaje de la onda se convierte en profundidad y si las mediciones fueron realizadas espaciadas uniformemente en perfiles de dos dimensiones puede generarse vistas en 3D. En este paso debe utilizarse toda la información recolectada previamente para una correcta interpretación. (ASTM, 2011)

Una de las mayores ventajas de la técnica del georadar es que los datos crudos pueden visualizarse en campo en tiempo real por medio de una pantalla. Estos se muestran con una dimensión vertical de nanosegundos, el cual es el tiempo del viaje de la onda. Sin embargo, en la mayoría de casos la profundidad es la que desea obtenerse, por lo tanto, es necesario tener conocimientos sobre la velocidad de propagación de la onda en diferentes medios para visualizar los datos apropiadamente. La calibración del equipo debe realizarse con mediciones directas de profundidad como la extracción de núcleos. (Griffin, s/f)

D. Estudio de pavimentos

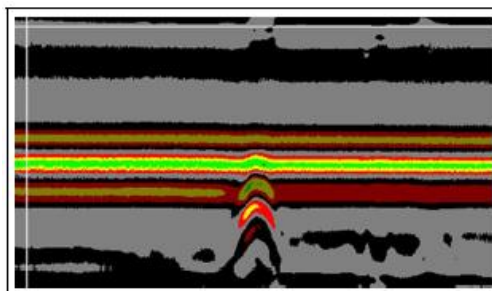
El GPR es ampliamente utilizado para el diagnóstico de la infraestructura vial. Esta técnica no es comúnmente utilizada para el control de calidad de nuevas estructuras, sin embargo, es utilizada para la identificación de partes dañadas por anomalías del pavimento que aparecen durante la vida útil de la estructura. Su principal objetivo es optimizar el mantenimiento, la reparación y los trabajos de construcción. Una de sus mayores ventajas es que puede ser utilizado para evaluar todo tipo de pavimentos, es decir, flexibles, semirrígidos, rígidos e incluso en pavimentos con sobrecapas de asfalto o de concreto. (Benedetto, 2015)

Los pavimentos son estructuras lineales, por lo tanto, la precisión de la ubicación en donde se tomen los datos juega un papel importante. El estudio puede realizarse de dos maneras según el propósito: si se requiere una visión más general de todo el pavimento y se busca encontrar secciones problemáticas se realizan mediciones no detalladas; mientras que si se quiere estudiar un tramo que ha sido seleccionado para intervención se realizan mediciones más detalladas. Las primeras deben realizarse en dirección longitudinal a altas velocidades para que el tráfico no se vea afectado. Por otro lado, los estudios detallados deben realizarse a bajas velocidades y, cuando se requiera, en dirección transversal para medir secciones transversales o identificar la profundidad de las grietas. (Benedetto, 2015)

Además de utilizar esta técnica para la determinación del espesor de capas, ésta puede detectar vacíos bajo las carpetas. Estos vacíos causan una pérdida potencial del soporte y son causadas por consolidación, hundimiento y/o erosión en el material de la base. Generalmente, esos vacíos ocurren bajo las juntas, en donde el agua se filtra y llega a la base, ocasionando que ésta se contamine con finos. Como las constantes dieléctricas para agua y aire son diferentes, por medio del georadar es posible determinar si el vacío bajo la carpeta está lleno de aire o de agua. (Loken, 2007)

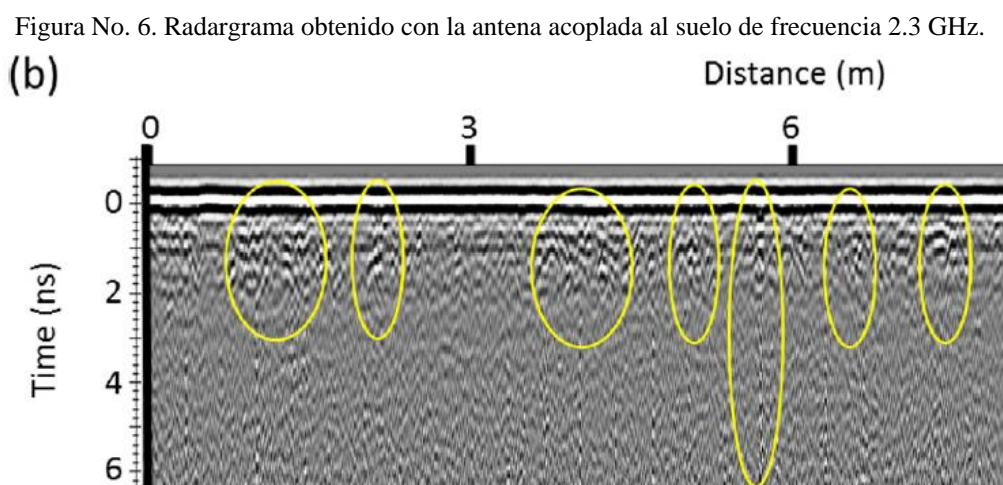
La base es una capa esencial en cualquier tipo de pavimento, distribuye, soporta y transmite las cargas de tránsito. Por esta razón, esta sufre de fallas durante su vida de servicio, siendo las grietas uno de los más usuales y mayores problemas. Si estas grietas no se detectan a tiempo pueden llegar a generar asentamientos en la base y grietas en la carpeta de rodadura. Se ha comprobado que el GPR es un método adecuado para la detección de grietas ocultas en la base y que la posición horizontal, la profundidad y el ancho de las mismas pueden determinarse si se encuentran en un medio homogéneo entre los dos primeros metros. Para lograrlo es necesario que la frecuencia de la antena sea la correcta, siendo las altas frecuencias más apropiadas para la caracterización de las grietas y las bajas frecuencias para detectarlas. Estas grietas ocultas que se encuentran en la base se muestran como pequeñas hipérbolas en el radargrama (ver Figura No. 5). (Li, 2016)

Figura No. 5. Hipérbola en radargrama que representa una grieta oculta en la base.



Fuente: Li, 2016

La determinación de la ubicación de las grietas ocultas en la base es de suma importancia, pues estas pueden influir en el módulo de elasticidad de la capa. Según Marecos *et al*, las antenas acopladas al suelo con una frecuencia de 2.3 GHz mostraron los mejores resultados para la detección de grietas, en la Figura No. 6 se muestra el radargrama obtenido, siendo los círculos amarillos las zonas con posibles discontinuidades debidas a grietas o la desunión de capas. Por lo tanto, en estos puntos se esperarían que los módulos de elasticidad de las capas que conforman el pavimento fueran bajas. La configuración utilizada para el GPR fue de 292 muestras por scan y un intervalo de 100 scans por segundo. Además, en esta misma fuente se comprobó que las amplitudes de las ondas electromagnéticas disminuyen con el aumento del contenido de arcillas o agua, lo cual afecta la profundidad de penetración de las ondas del georadar. (Marecos *et al*, 2017)



Fuente: Marecos *et al*, 2017

Los daños en los pavimentos flexibles se generan cuando los agregados y la carpeta asfáltica son incompatibles, pues la adhesión se pierde y el agua los separa. El GPR es particularmente sensible a la humedad, por lo tanto puede identificar áreas en donde hay filtraciones de agua, las cuales pueden causar la desunión de las interfaces. El GPR puede captar las variaciones en el pavimento y proveer un grado de severidad de las discontinuidades. (Benedetto, 2015)

Para los pavimentos rígidos se tiene que el concreto es un material de baja conductividad, siendo un medio no metálico ideal para la propagación de ondas del GPR. Sin embargo, muchas veces el concreto contiene refuerzo de acero, el cual es metal y por consiguiente refleja completamente la señal del GPR y crea una sombra sobre lo que está directamente debajo de él. La subbase normalmente es un suelo altamente conductivo, como arcillas, que atenúa la propagación de señal del georadar, limitando así la penetración. La constante dieléctrica relativa de medios no metálicos está en función de tres diferentes materiales entre el medio: sólido, fluido y gas. Por ejemplo, la constante dieléctrica relativa para un suelo

no saturado es la combinación de las constantes dieléctricas del aire, del agua y del suelo, la porosidad y el grado de saturación. (Gehrig, 2004)

Para evaluaciones de estructuras de pavimento de concreto, usualmente se utiliza una antena acoplada al suelo monoestática por su alta eficiencia en recolectar datos y procesarlos. Se le denomina antena mono estática a aquella que transmite y recibe la señal. Es recomendable utilizar antenas con altas frecuencias, generalmente mayores a 900 MHz, ya que estas ofrecen alta resolución. (Gehrig, 2004)

1. Equipo y métodos utilizados. Para el diagnóstico de estructuras viales, usualmente se utilizan antenas entre el rango de cientos de MHz hasta 4 GHz. Los radares de frecuencia escalonada son mayormente usados para los estudios que requieren detalles, ya que estos miden la amplitud y la fase de la señal reflejada para cada frecuencia y transforman esta información a un perfil de tiempo. Para estudios de espesor de capas específicamente, las antenas aéreas de 1 a 2 GHz de frecuencia han mostrado ser las más efectivas. Sin embargo, si se requieren detalles con profundidades mayores a 0.6 metros, la antena acoplada al suelo es la mejor opción. (Benedetto, 2015)

La velocidad de la señal del radar está relacionada con la constante dieléctrica del material que atraviesa, por esta razón, no es recomendable realizar estudios con el GPR en época de invierno, pues el contenido de humedad en las diferentes capas afecta las lecturas y pueden dar valores erróneos. En el Cuadro No. 6 se muestran las constantes dieléctricas de materiales comúnmente utilizados en pavimentos. Las letras en paréntesis que se encuentran a la par del nombre del material son las características que influyen en las propiedades eléctricas del mismo y significan lo siguiente:

- d: densidad
- w: porosidad y contenido de humedad
- f: frecuencia de antena
- t: temperatura
- s: salinidad
- p: presión

(ASTM, 2011)

Cuadro No. 6. Propiedades electromagnéticas de materiales comúnmente utilizados en pavimentos.

Material	Relative Permittivity, K	Pulse Velocities, m/Ns
Air	1	0.3
Fresh water (f,t)	81	0.033
Sea water (f,t,s)	70	0.033
Sand (dry) (d)	4-6	0.15-0.12
Sand (saturated) (d,w,f)	25	0.055
Silt (saturated) (d,w,f)	10	0.095
Clay (saturated) (d,w,f)	8-12	0.106-0.087
Dry sandy coastal land (d)	10	0.095
Fresh water ice (f,t)	4	0.15
Permafrost (f,t,p)	4-8	0.15-0.106
Granite (dry)	5	0.134
Limestone (dry)	7-9	0.113-0.1
Dolomite	6-8	0.122-0.106
Quartz	4	0.15
Coal (d,w,f, ash content)	4-5	0.15-0.134
Concrete (w,f, age)	5-10	0.134-0.095
Asphalt	3-5	0.173-0.134
Sea ice (s,f,t)	4-12	0.15-0.087
PVC, epoxy, polyesters vinyls, rubber (f,t)	3	0.173

Fuente: ASTM, 2011

Para calcular el espesor de las capas es indispensable calcular la velocidad de propagación de onda, la cual ha sido deducida de la constante dieléctrica publicada en literaturas, sin embargo, muy pocas veces se ha tomado en cuenta la complejidad e incertidumbre de la naturaleza. Esta velocidad puede determinarse mediante los siguientes métodos:

- Utilizar la información disponible sobre las velocidades de los diferentes materiales utilizados en estructuras de pavimento. Este método es el menos preciso y puede usarse solamente para interpretaciones preliminares.
- Realizar calicatas, las cuales proveen información puntual específica y pueden ser utilizadas para calibrar el georadar.
- Calcular la velocidad de la antena utilizando un plato de metal sobre la superficie del pavimento. (Benedetto, 2015)

2. Normas. La norma ASTM D4748-10 con el título “Método de evaluación estándar para la determinación del espesor de capas de pavimento utilizando radares de corto pulso” trata especialmente de la aplicación de GPR para determinar los espesores de capa de un pavimento. Menciona que las antenas con 1 GHz de frecuencia pueden identificar el espesor de la capa de superficie de hasta 40 centímetros con una precisión de ± 5 milímetros, mientras que las antenas con 2 GHz pueden identificar una capa de espesor menor que 25 centímetros con la precisión de ± 2.5 milímetros. (Benedetto, 2015)

Además, la norma ASTM D6432 llamada “Guía estándar para el uso del georadar para investigación de la subsuperficie” establece las siguientes limitaciones inherentes a este método:

- Un conjunto de datos específico no puede ser siempre asociado con una única condición de la subsuperficie. Por lo tanto, muchas veces las mediciones realizadas con este método no pueden resolver ambigüedades y es necesario contar con información adicional obtenida por métodos no geofísicos.
- La resolución de los radargramas disminuye conforme aumenta la profundidad de análisis. Adicionalmente, estos dos factores dependen directamente de las condiciones del sitio en específico en donde se esté realizando el estudio. Esto ocasiona que para suelos no conductivos se tendrá una profundidad de penetración de onda pequeña y con baja resolución, mientras que en un suelo saturado se tendrán grandes profundidades con buena resolución.
- La amplitud de la onda reflejada y la señal transmitida son influidas por el coeficiente de reflexión, el cual cambia en las interfaces de materiales. Para obtener un radargrama con espesores bien definidos es necesario que el contraste entre las propiedades eléctricas de los materiales sean suficientemente marcadas.
- Las mediciones pueden verse afectadas por interferencias causadas por las siguientes condiciones:
 - Ruido (señales no deseadas) causado por factores geológicos o ambientales como: rocas, madrigueras de animales, raíces de árboles u otras irregularidades. Esto, además de producir ruido, puede causar la dispersión de las ondas electromagnéticas.
 - Señales no deseadas ocasionadas por factores culturales que se encuentran debajo o cerca del perfil de estudio como: metal en o sobre la superficie, cimentaciones, barras de refuerzo, cables, tubos, tanques y túneles. En algunas ocasiones, las transmisiones electromagnéticas cercanas de celulares, radios, televisiones e incluso microondas pueden generar ruido en los radargramas.

Para reducir estas señales no deseadas se recomienda utilizar una antena blindada.

(ASTM, 2011)

Esta misma norma, adicionalmente, explica que el espesor de penetración del equipo se determina principalmente por la atenuación de las ondas electromagnéticas, la cual ocurre por el contenido de agua en el material y/o por la dispersión de energía en diferentes direcciones por irregularidades en la subsuperficie. Otros factores que también influyen en la atenuación son el tipo, la temperatura y la mineralogía del suelo. (ASTM, 2011)

La especificación técnica de Inglaterra DMRB 7.3.2: Información para evaluar pavimentos – anexo 6 HD 29/2008: Radar de penetración (DMRB 7.3.2 2008) afirma que la velocidad de la toma de datos es un factor importante. Se define como “baja velocidad” a velocidades menores a 30 kilómetros por hora y “velocidad de flujo de tránsito” a velocidades mayores a 80 kilómetros por hora. Además, clasifica exactitudes para el uso del GPR (de A a D), asignándoles las siguientes aplicaciones:

- A: mediciones rutinarias con suficiente precisión y confiabilidad. Tiene aplicaciones como medir los espesores de capa de obras viales.
- B: es necesario verificar los resultados del GPR con otro método. Si se toman las mediciones a baja velocidad se pueden identificar vacíos bajo pavimentos de concreto no reforzado y cambios de humedad en la capa de sub-base. Esta clasificación no aplica para velocidades de flujo de tránsito.
- C: sólo para casos excepcionales. Para mediciones hechas a bajas velocidades pueden determinarse las profundidades de grietas
- D: no se puede verificar. (Benedetto, 2015)

El proyecto Mara Nord lanzó un reporte llamado “Recomendaciones para la utilización del GPR en el control de calidad de construcción de obras viales”. Su principal objetivo es describir los pasos precisos de esta práctica para que el contratista pueda saber exactamente cómo las investigaciones con GPR deben realizarse y el nivel de calidad que deben tener los resultados. La información más relevante se menciona a continuación:

- Las antenas aéreas deben utilizarse especialmente cuando el interés sea pavimento bituminoso y el espesor y la calidad de una base sin consolidar.
- Usualmente, solamente la carpeta, la base y el espesor total de la estructura de pavimento se estudia.
- Normalmente, la precisión en estudios con el GPR es $\pm 10\%$ de la profundidad sin que hayan muestras disponibles y $\pm 5\%$ si se tienen.
- La interpretación preliminar del espesor se realiza utilizando valores dieléctricos.
- Generalmente, el mínimo de líneas longitudinales es una por carril.
- Para sistemas acoplados al suelo con antenas de 300 a 600 MHz, la distancia de la antena a la superficie del pavimento no debe exceder 8 centímetros y con antenas de 1 GHz o mayor frecuencia no debe exceder 5 milímetros.

- Los datos de referencia pueden provenir de calicatas, de muestras o de excavaciones.
- Las interpretaciones del GPR deben ser grabadas en intervalos no mayores a 1 metro.
- El espesor de las estructuras medidas deben de presentarse en perfiles longitudinales que presenten la diferencia de los datos medidos con los datos para diseño.

(Benedetto, 2015)

Otro reporte del proyecto Mara Nord trata del uso del GPR en la rehabilitación de proyectos viales. Los puntos más importantes son:

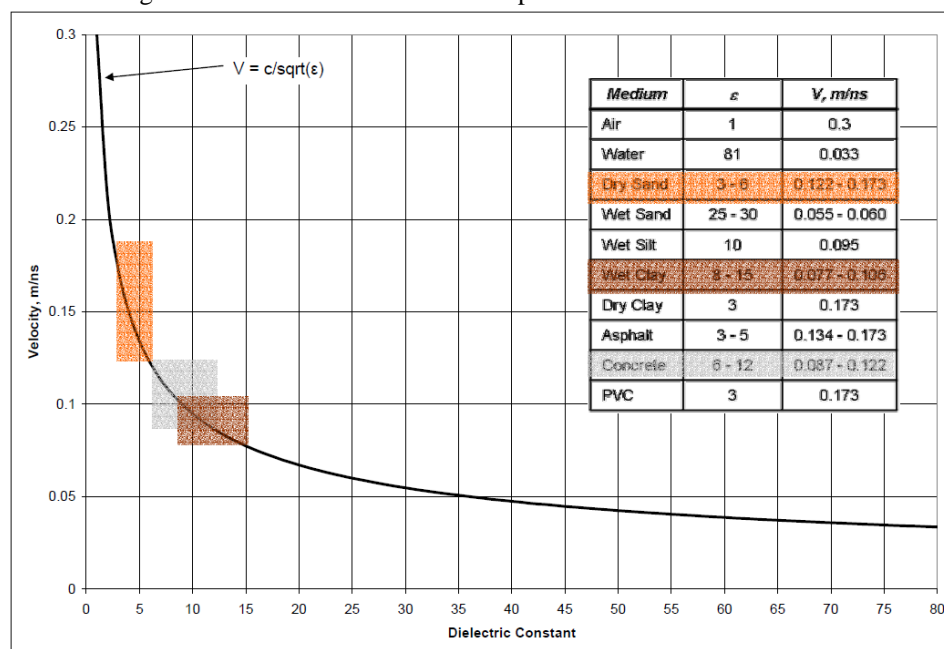
- Se ha comprobado que los videos y las imágenes digitales tomadas durante la recolección de datos con el GPR son esenciales para el análisis de datos.
 - Estudios utilizando antenas acopladas al suelo pueden realizarse durante cualquier época del año.
 - Los estudios 2D pueden hacerse mediante sistema con varios canales, por ejemplo con una antena aérea de 1.0 a 2.5 GHz acompañada por una antena acoplada al suelo de 300 a 600 MHz.
 - El principio básico es que las mediciones son hechas en el exterior de la trayectoria de la llanta en la dirección principal del camino.
 - El intervalo para que emita señal el georadar debe ser al menos 10 escáneres por metro en perfiles longitudinales y al menos 40 escáneres por metros en perfiles de sección transversal.
 - Usualmente, las calicatas para referencia deben realizarse a cada 2 o 3 kilómetros.
- (Benedetto, 2015)

3. Radargramas. Los radargramas obtenidos por el GPR tienen características que incluyen:

a. Fuerza de reflexión. Es la cantidad de energía reflejada es una función de la constante dieléctrica. Mientras más contraste de esta propiedad haya entre dos medios, mayor será la energía reflejada, siendo las características del radargrama más evidentes. La constante dieléctrica de una capa de concreto es aproximadamente 7. Si las capas que están por debajo del concreto tuvieran una constante dieléctrica entre 5 y 10, las reflexiones se verían suaves y la diferencia entre capas sería difícil de visualizar. (Gehrig, 2004)

Generalmente, si el suelo por debajo de una carpeta es arcilla húmeda, ambos materiales tienen constantes dieléctricas similares, lo cual resultaría como una reflexión suave o inclusive, sin reflexión alguna en la interface entre los dos medios. Por otro lado, si debajo de la losa hay un vacío lleno de aire o agua, esta sería una reflexión fuerte. En la siguiente gráfica pueden observarse valores aproximados utilizados para los estudios de concreto. (Gehrig, 2004)

Figura No. 7. Constantes dieléctricas para evaluaciones de concreto.

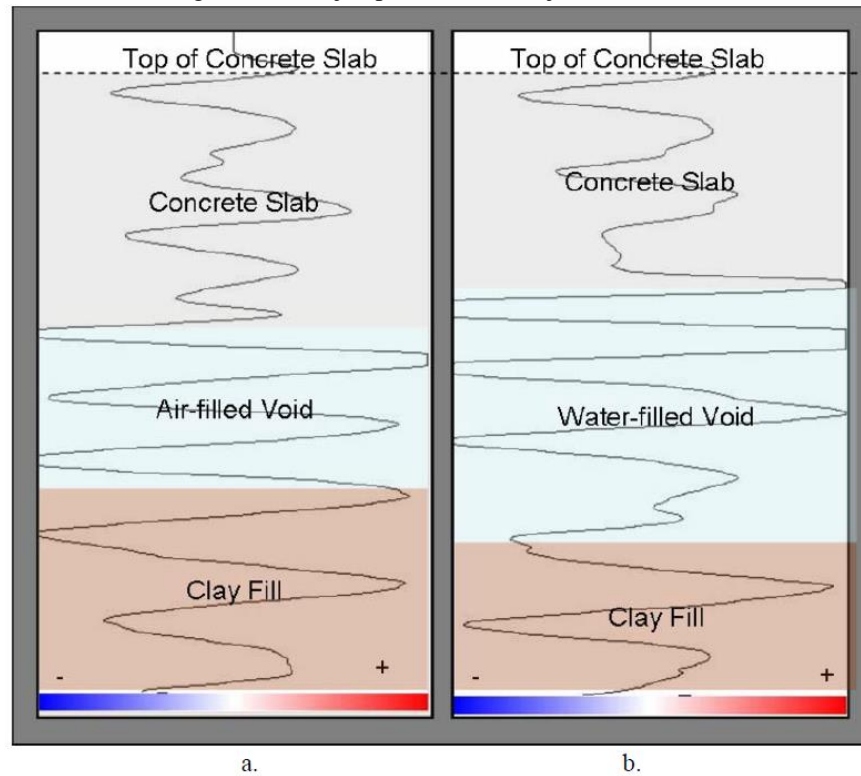


Fuente: Gehrig, 2004

b. Polaridad de la señal. Esta característica está también en función de la constante dieléctrica, pues esta influye en el coeficiente de reflexión, el cual se define por la ecuación No. 1. Si este coeficiente es positivo, entonces una amplitud positiva es precedida por una negativa; mientras que si tiene un valor negativo es lo contrario. La polaridad invertida por la inversión de fases ocurre cuando la constante dieléctrica de la capa 1 es mayor que la de la capa 2, lo cual da un coeficiente de reflexión negativo. (Gehrig, 2004)

Por ejemplo, una polaridad negativa ocurriría para vacíos llenos de aire bajo la losa de concreto y para un vacío lleno de agua ocurriría una reflexión positiva. Esto se debe a que la constante dieléctrica del agua es 81, la cual es mucho mayor a la constante del concreto. En la Figura No. 8 se muestra la polaridad de la señal del georadar bajo una losa de concreto. Puede observarse que para el vacío lleno de aire, en la interfaz ocurre un cambio de amplitud positiva (de la losa de concreto) a una negativa; mientras que para un vacío lleno de agua la amplitud positiva se mantiene en la interfaz concreto-vacío. Este principio puede ser utilizado para la detección del contenido dentro de una tubería PVC, pues una tubería llena de agua tendrá la polaridad opuesta con respecto a una vacía. (Gehrig, 2004)

Figura No. 8. Ejemplo de vacíos bajo la losa de concreto.



Fuente: Gehrig, 2004

c. Tiempo de viaje de la onda. Es el tiempo que le toma a la onda viajar a través de un medio, llegar a una interfaz y viajar de regreso al receptor. Para la evaluación del espesor de una losa de concreto, las variaciones en este tiempo representan variaciones en el espesor, siendo éste menor mientras más pequeño sea el tiempo. La velocidad de propagación (V) puede calcularse en base a los tiempos de viaje (tt) y a la profundidad del medio (d) en una ubicación particular por medio de la siguiente ecuación (Gehrig, 2004):

Ecuación No. 7. Velocidad de propagación de la onda.

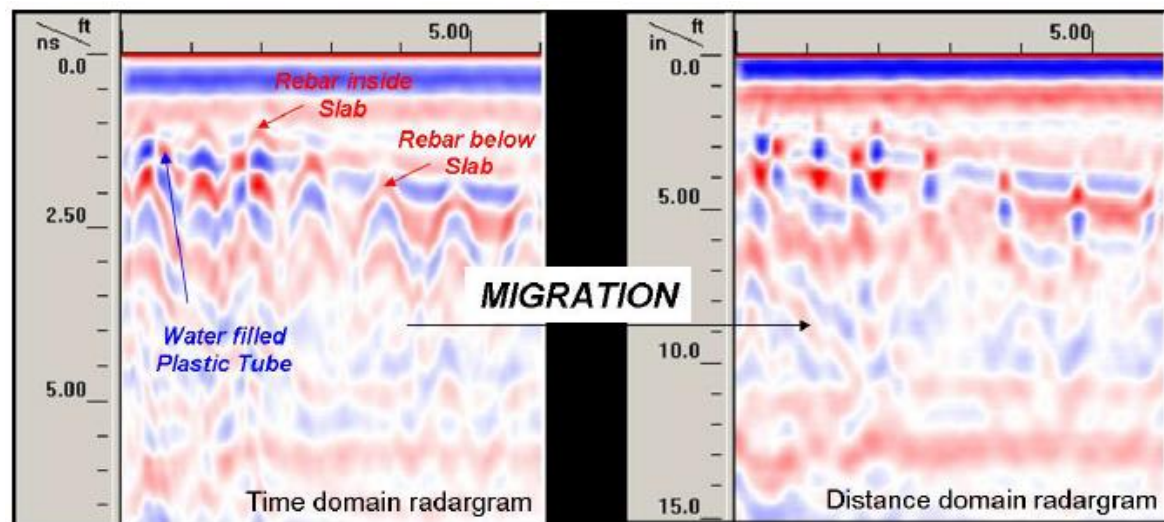
$$V = \frac{2 \times d}{tt}$$

Según la norma ASTM D6432, estas velocidades deben de ser medidas en varias locaciones si existen variables en la composición del suelo o roca y en su contenido de humedad. Este cálculo se realiza más que todo cuando no se sabe la constante dieléctrica del material en análisis. (ASTM, 2011)

d. **Reflexión hiperbólica.** Cuando el transmisor de señal irradia energía en la superficie, esta onda es cónica por naturaleza. El ángulo del cono puede variar entre 60 a 90 grados. Entonces, las formas hiperbólicas en los radargramas aparecen cuando la antena pasa sobre un objeto lineal, como refuerzos de acero y tuberías, que están situados perpendicular al trayecto de la antena. Estas hipérbolas se generan porque las antenas tienen un patrón ancho de transmisión, por lo tanto, la antena detecta el objeto no sólo cuando éste está directamente debajo de ella sino que también antes y después del objeto. Cuando la antena se acerca al objeto se forma la parte izquierda de la hipérbola, mientras que el vértice representa la parte de arriba del mismo. La hipérbola se termina de formar cuando la antena se aleja del objeto. (Gehrig, 2004)

Mientras mayor sea la constante dieléctrica, menor será su velocidad de propagación y más angosta será la hipérbola. Por lo tanto, un objeto que se encuentre dentro de un medio con una constante dieléctrica alta producirá hipérbolas angostas y viceversa. Este principio puede verse en la Figura No. 9, pues la flecha roja izquierda representa una varilla de refuerzo entre una sección de concreto, el cual es un medio con una constante dieléctrica alta y, por lo tanto, la hipérbola que se forma es angosta. Por otro lado, la flecha roja derecha representa una varilla entre un medio arenoso, ya que como la hipérbola formada es ancha, el medio debe de tener una constante baja. (Gehrig, 2004)

Figura No. 9. Ejemplo de migración de radargrama.

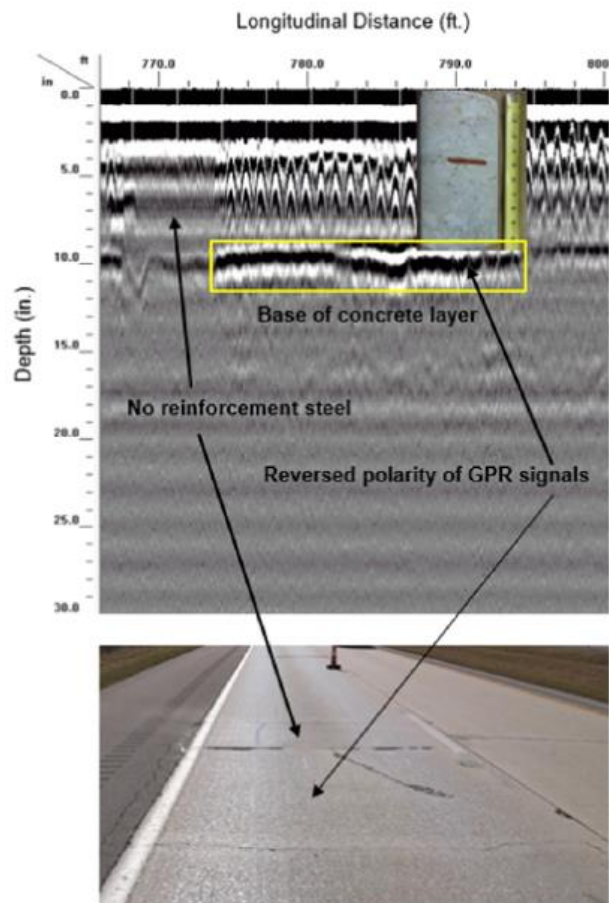


Fuente: Gehrig, 2004

En la Figura No. 9 puede observarse el escalamiento geométrico, el cual es un proceso que involucra la migración de la información del GPR de un radargrama dependiente del tiempo a una imagen realista de la subsuperficie dependiente de la distancia. Es importante notar como las hipérbolas se vuelven puntos, los cuales representan refuerzo o tubos. (Gehrig, 2004)

e. Ejemplo. En un estudio de un pavimento rígido sobre un terreno granular realizado por Li *et al.*, se obtuvo el radargrama que se muestra en la Figura No. 10. En ésta puede observarse el acero de refuerzo de la losa representado por hipérbolas y la interfaz concreto-suelo. La polaridad inversa de la señal en la interfaz fue identificada como un vacío lleno de aire entre el concreto y el suelo, pues la velocidad de las ondas electromagnéticas aumentó al pasar por este tramo. Además, se localizó un tramo en donde no había acero de refuerzo, careciendo el radargrama de hipérbolas. En la imagen inferior puede verse los efectos superficiales que tienen estos defectos en las losas. (Li *et al.*, 2016)

Figura No. 10. Radargrama de estudio de losa de concreto y las consecuencias superficiales de las anomalías detectadas.



Fuente: Li *et al.*, 2016

VIII. OTRAS APLICACIONES DEL GEORADAR EN INGENIERÍA CIVIL

Nuevos avances en el desarrollo de programa, ensayos de laboratorios bajo condiciones controladas y numerosos casos de estudio han llevado a la aplicación efectiva del georadar para la inspección y evaluación de edificios. Todos los materiales de construcción se deterioran con los años y con la exposición al ambiente, sin embargo, muchas veces, estos daños no pueden ser detectados superficialmente. Por razones de costos, el mantenimiento a las estructuras se realiza hasta que los daños se empiezan a ver o hasta que partes de la misma fallen. Especialmente, esto se hace con las construcciones antiguas que pertenecen al patrimonio cultural del país, en las cuales no pueden utilizarse ensayos destructivos. En estos casos es necesario realizar mantenimiento preventivo para asegurar la seguridad de las personas y de la misma estructura. Otras razones para inspeccionar los edificios son después de movimientos telúricos u otros desastres naturales. El mantenimiento no puede realizarse de manera eficiente sino se tiene información sobre los daños. (Benedetto, 2015)

El GPR permite evaluar las estructuras sin que éstas tengan que estar fuera de servicio. Éste es utilizado principalmente para detectar refuerzo y grietas, evaluar edificios de concreto y mampostería e inspeccionar muros y columnas. Incluso, existen algunos estudios especiales que han podido demostrar que con la información que brinda el georadar pueden determinarse la degradación del concreto por corrosión y los daños ocasionados por las raíces de los árboles. Sin embargo, para estos tipos de estudios se necesita contar ensayos de laboratorio bajo condiciones controladas y mucho conocimiento no solamente sobre la técnica del georadar sino que también sobre los materiales de construcción y comportamiento de estructuras. (Benedetto, 2015)

Dentro de los ensayos no destructivos, el GPR es uno de los más utilizados para la inspección de edificios por su bajo costo y la cantidad de información que brinda. Mayormente, éste es utilizado para seleccionar partes del edificio que necesitan un análisis más profundo con otros métodos de análisis, por lo tanto, el GPR es considerado como una técnica complementaria. Los métodos que son conjuntamente utilizados con el GPR son evaluaciones de resistencia con técnicas electromagnéticas, sísmicas y/o ultrasonido. (Benedetto, 2015)

La metodología para la recolección de datos depende en gran medida del elemento de la estructura que está siendo analizado. En muchas evaluaciones el suelo, las paredes y el piso son examinados cuidadosamente para detectar elementos o zonas afectadas por agua o grietas. En estos casos es recomendable realizar solamente un perfil de análisis. Mientras que, para edificios con dimensiones muy

grandes, pueden realizarse perfiles para formar imágenes tridimensionales. Para la evaluación de elementos específicos, como muros, columnas y vigas, se recomienda utilizar antenas de altas frecuencias (900 MHz, 1, 1.6 y 2.3 GHz). (Benedetto, 2015)

Otra aplicación de la técnica del georadar es el estudio del suelo y de las cimentaciones de estructuras. El objetivo de evaluar el suelo bajo y alrededor del edificio es, usualmente, la detección de estructuras geológicas que puedan causar daño o fallas a la construcción. Aunque existan pocos estudios de cimentaciones realizados con este método, algunos han logrado detectar daños estructurales que afectan las cimentaciones. (Benedetto, 2015)

El georadar también puede ser utilizado para evaluar puentes de concreto o de mampostería que muestran problemas como grietas, corrosión de refuerzo y filtraciones de agua, ante una inspección visual. Se recomienda utilizar antenas con frecuencias mayores a 1 GHz y realizar perfiles tanto en direcciones longitudinales como transversales. El GPR puede utilizarse para determinar lo siguiente:

- Posición del refuerzo en la cubierta del puente
- Recubrimiento de concreto del refuerzo en la cubierta del puente
- Espesor de la cubierta
- Posición de los tendones pre-esforzados o post-tensados o los ductos de los tendones
- Deterioro de la cubierta del puente (grietas, cavernas, etc.)
- Diagnosticar las vigas del puente

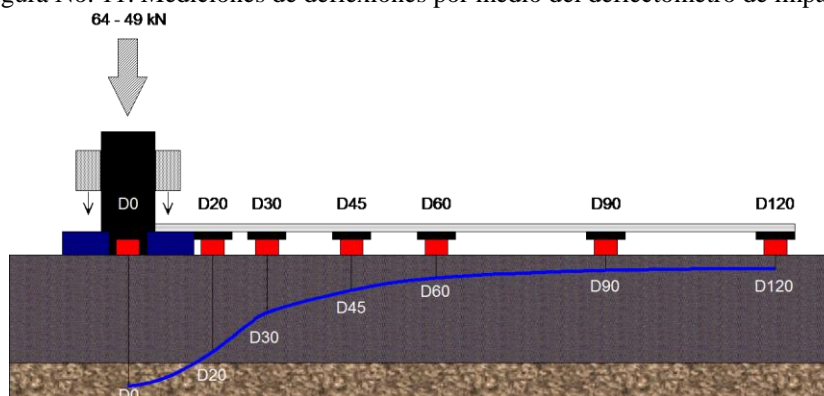
(Benedetto, 2015)

Con el georadar es posible recolectar información sobre el subsuelo, lo cual toma suma importancia cuando se quiere realizar cualquier construcción bajo el terreno. Es importante detectar obstáculos como cables, tuberías, otras construcciones, vacíos, etc. Los localizadores eléctricos son eficientes para encontrar cables y tuberías de metal, sin embargo, son incapaces de detectar materiales no metálicos como plásticos, concreto, cerámica o cables de fibra óptica. La técnica del georadar no tiene esta limitación y puede detectar cualquier tipo de material en el subsuelo. En ciudades como Estocolmo, Malasia, Atlanta, Hong Kong, Sao Paulo y Nueva York han aplicado el GPR para realizar un mapeo de los servicios y otros obstáculos como por ejemplo: tubería principal de suministro de agua, drenajes, cables de electricidad, raíces de árboles, etc. La frecuencia de las antenas utilizadas en estos proyectos dependía de la profundidad que se esperaba encontrar los objetos de análisis. (Benedetto, 2015)

IX. ENSAYO COMPLEMENTARIO: DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO

El deflectómetro de impacto o también conocido FWD por sus siglas en inglés “Falling Weight Deflectometer” es el equipo actual más desarrollado para simular y medir la respuesta de un pavimento. Éste cuenta con un sistema de aplicación de carga que se genera por medio de un pulso producido por la caída de un peso específico sobre la superficie de pavimento, simulando así el efecto de un vehículo circulando sobre él a una velocidad de 60 o 70 kilómetros por hora. Entonces, el deflectómetro mide la deflexión del pavimento directamente bajo el área de la aplicación de la carga y también en una serie de 6 a 9 puntos localizadas a diferentes distancias del centro de impacto por medio de geófonos (ver Figura No. 11). (Leal, 2010)

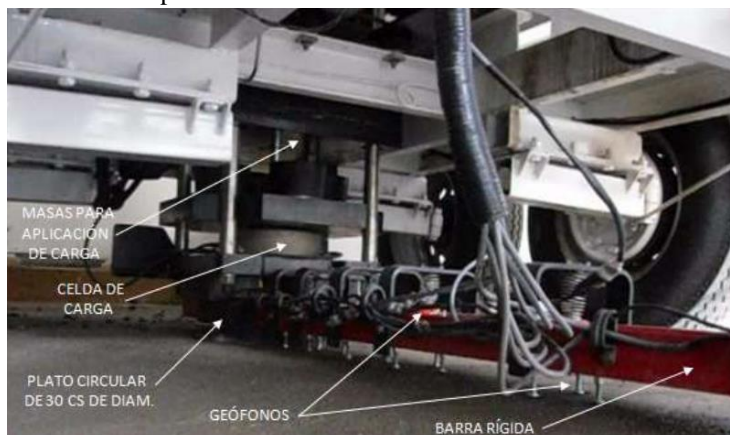
Figura No. 11. Mediciones de deflexiones por medio del deflectómetro de impacto.



Fuente: Leal, 2010

Como complemento a estos, el deflectómetro cuenta con sensores de temperatura, los cuales se encargan de medir la temperatura ambiente y la superficial del pavimento al momento de realizar el ensayo. La temperatura es muy importante cuando se evalúan pavimentos flexibles, pues el asfalto a temperaturas bajas tiene una resistencia alta pero se comporta frágilmente; mientras que a altas temperaturas es débil, pero su comportamiento dúctil. Por estos efectos se corrige la rigidez del pavimento según la temperatura registrada por el equipo. (Leal, 2010)

Figura No. 12. Componentes básicos de medición del deflectómetro de impacto.



Fuente: Leal, 2010

El área del cuenco de deflexiones (ACD) se define por la Ecuación No. 8 y conjunto con las deflexiones máximas de la carpeta permiten distinguir el comportamiento estructural de los pavimentos por medio de los siguientes criterios básicos:

Cuadro No. 7. Interpretación del comportamiento de un pavimento según su área del cuenco de deflexiones y su deflexión máxima.

ACD	d0	INTERPRETACIÓN
Baja	Baja	Pavimento Débil / Subrasante Fuerte
Baja	Alta	Pavimento Débil / Subrasante Débil
Alta	Baja	Pavimento Fuerte / Subrasante Fuerte
Alta	Alta	Pavimento Fuerte / Subrasante Débil

Fuente: Leal, 2010

Ecuación No. 8. Área del cuenco de deflexiones ACD.

$$Area = 150 * \left[1 + 2 \left(\frac{d30}{do} \right) + 2 \left(\frac{d60}{do} \right) + \frac{d90}{do} \right]$$

Los valores del área del cuenco de deflexiones varían según el tipo de pavimento que esté siendo analizado. Por otro lado, las deflexiones máximas de la carpeta varían según el diseño de tránsito que se realice (número de ESAL).

Cuadro No. 8. Rangos esperados de ACD según el tipo de pavimento.

TIPO DE PAVIMENTO	Valor área
Flexible	<600
Semirígido	600-710
Rígido	>700

Fuente: Crespo, 2001

Cuadro No. 9. Deflexiones máximas de la carpeta asfáltica según el diseño de tránsito.

Carpeta	
ESAL (*10⁶)	Deflexión máx (µm)
<5.0	600.00
<10.0	500.00
<30.0	400.00
<50.0	350.00

Fuente: Colegio de Ingenieros de Guatemala, 2001

La rigidez de las capas del pavimento se define por medio del módulo de elasticidad, el cual es determinado por medio de la información brindada por el deflectómetro de impacto. Uno de los parámetros más influyentes en el cálculo de este módulo es el espesor de la capa analizada, por lo tanto, usualmente se realizan algunas extracciones de núcleos. Sin embargo, por razones de tiempo, costos y que estos ensayos son destructivos, no se ejecutan en todas las localidades en donde se realiza el ensayo con el deflectómetro, obteniendo así valores de módulos de elasticidad no representativos y erróneos. Por esta razón, es imprescindible utilizar el georadar conjunto con el deflectómetro para mejorar la precisión de la rigidez de las capas. (Ahmed, 2014)

En un estudio realizado en México se realizaron ensayos con el deflectómetro en un pavimento rígido con el objetivo de determinar la importancia del espesor en el cálculo del módulo de elasticidad. Por consiguiente, éstos se calcularon tanto con los espesores estimados obtenidos por calicatas como con los obtenidos por medio del georadar. Los resultados mostraron una diferencia de 14.9% en el módulo de la carpeta, 22.5% en el de la base y 36.5% en el de la subbase, siendo el georadar el más exacto. En la base y la subbase se obtuvieron mayores porcentajes de diferencia, pues su espesor puede variar mucho en una sección corta del pavimento, ocasionando así que los valores de las calicatas no sean representativos. Esto muestra la necesidad de utilizar el deflectómetro conjunto el GPR para obtener resultados lo más parecido a la realidad. (Ahmed, 2014)

X. METODOLOGÍA DE TRABAJO PARA MEDICIONES CON EL GEORADAR

A. En campo

Pasos para armar el equipo del georadar de la marca sueca Mala Pro Ex:

- a. Conectar los cables de fibra óptica, que vinculan la alimentación de la antena (transmisor) con la unidad de control (receptor), la cual contiene módulos de diferentes frecuencias. En el módulo de baja frecuencia conectar las antenas de 250, 500 u 800 MHz; mientras que en el de alta frecuencia la antena de 2.3 GHz.
- b. Conectar el monitor con la unidad de control por medio de un cable de red.
- c. Alimentar el sistema con baterías de 12 voltios.
- d. Encender el monitor y elegir la opción para un proyecto 2D, luego presionar el ícono de herramientas y revisar en la opción “slot” (puerto) si ambas antenas están emitiendo señales. Si la gráfica que aparece en el monitor es una línea vertical recta es porque existe algún problema en las antenas y éstas no están emitiendo señal. Usualmente, la antena de baja frecuencia se conecta en el puerto A y la de alta frecuencia en el puerto B.
- e. Seleccionar en esa misma ventana, la antena que está siendo utilizada y el tipo de transporte en el que van las antenas en la opción “Wheel type” (tipo de transporte). Es importante seleccionar la opción correcta cada vez que se cambie el transporte de antenas, pues de éste depende el odómetro.
- f. Colocar en la opción “point interval”, el intervalo con el que se requiere que la antena emita señales.
- g. Ajustar en “signal parameters” (parámetros de la señal) la señal moviendo la línea roja al primer pico positivo (a la derecha) que se vea en la gráfica, pues este marca la interfaz entre el aire y la superficie de estudio.
- h. Elegir la resolución que se requiere. Es importante notar que mientras más resolución, se necesita más memoria e ir a menores velocidades. Por eso, en los estudios de pavimentos se recomienda una resolución entre 1 a 8 stacks (resolución), pues se quiere ir a velocidades altas.
- i. Controlar en la pantalla los datos crudos en campo, ya que es una forma de asegurarse que las antenas, el odómetro y demás componentes están funcionando correctamente.
- j. Extraer los datos tomados por el georadar por medio de conectar un USB al puerto de la pantalla del equipo.
- k. Realizar un croquis y numerar los perfiles que se van realizando para poder identificarlos al momento de analizarlos en oficina.

El primer ejemplo analizado fue el único para el cual se utilizó el carrito todo terreno, por lo que se elige “cart” en la opción de tipo de transporte. Mientras que para tomar las lecturas directamente sobre las extracciones de núcleo se utilizó el “mini cart” con la antena de alta frecuencia. El point interval para ambos casos fue de 0.10 metros, lo cual fue posible porque las distancias a medir no eran grandes y por no contar con tránsito se pudo ir a velocidades bajas. Por estas mismas razones, se optó por una resolución alta de 8 stacks.

En la autopista Palín-Escuintla se tenía varios kilómetros de longitud, por lo tanto, se utilizó la configuración de carretón adaptable al automóvil, por lo que se seleccionó “road cart”. El point interval escogido para este caso fue de 0.30 metros, pues se deseaba ir a velocidades de aproximadamente 60 kilómetros por hora. Como era una autopista, el tránsito es impredecible y se debió de aumentar o reducir la velocidad varias veces, por lo que se optó por la opción de “Autostacks” (resolución automática), la cual es la mejor alternativa para que la resolución varíe automáticamente según la velocidad.

Por último, para el pavimento rígido también se utilizó el carretón adaptable al automóvil. Para este caso la antena de baja frecuencia es la que nos brinda los datos relevantes por el espesor mayor de la carpeta de concreto hidráulico. Aunque solamente se midieron 700 metros, en el lugar había tránsito, por lo que no se podía ir tan lento. Por esta razón se optó por la siguiente configuración: point interval de 0.25 metros con 4 stacks de resolución.

B. En oficina

En la actualidad existen muchos programas para el procesamiento de datos del georadar. En este trabajo se empleó ReflexW, el cual es un programa para el proceso e interpretación de datos obtenidos por medio el GPR, reflexiones y refracciones sísmicas y ultrasonidos.

1. Importar el radargrama de interés al programa ReflexW para empezar el análisis 2D. Si se utilizaron dos antenas, los archivos de la antena con menor frecuencia se guardan con la letra A y los de mayor frecuencia con la letra B. El equipo genera varios archivos, sin embargo, el que se debe importar al programa es el que tiene la terminación .rd3.
2. Modificar el lugar en donde empieza la superficie de estudio, pues éste originalmente muestra el origen (0) tomado desde la parte inferior de la antena. Como entre la antena y la superficie tenemos aire, entonces existe una interface entre ambos, la cual se marca por el primer pico positivo de la onda, pues es la primera reflexión y proviene de la superficie. En ReflexW puede obtenerse el valor en donde ocurre este pico por medio de la herramienta “Wiggle Window”. Al ya saber este valor, debe editarse el tiempo de inicio del radargrama.

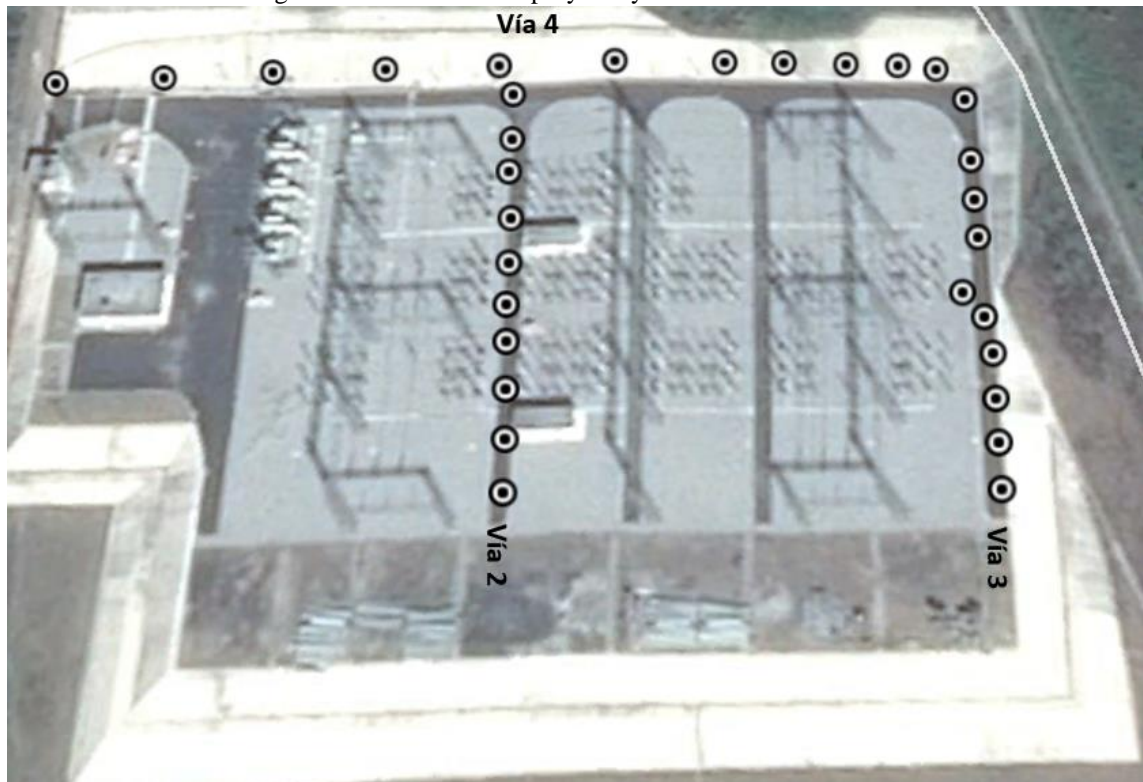
3. Aplicar filtros:
 - a. Usualmente, el primer filtro que se utiliza es “subtract-mean (dewow)”, el cual se encuentra entre los filtros en 1D. Éste es el encargado de desaparecer las oscilaciones de alta frecuencia.
 - b. Se selecciona el filtro “background removal” que se encuentra dentro de los filtros 2D. Como su nombre lo especifica, éste elimina los ruidos y ondas débiles del radargrama.
 - c. Por último, para amplificar la señal y ver las fases más definidas se utiliza el filtro “Gain Function”. Éste filtro es recomendable utilizarlo solamente cuando se esté analizando el espesor de losa o de carpeta de rodadura y no la base, pues como amplifica todas las señales se perderá la fase de la misma.
4. Al ya observar las interfaces claras se procede a marcarlas por medio de “picks” (selecciones). Si la fase es muy clara puede utilizarse “phase follower” (seguir fase automáticamente), el cual es un comando que marca la fase automáticamente. Si por el contrario, la fase presenta discontinuidades o partes que no están bien definidas es necesario modificar la fase marcada automáticamente por el programa con la opción “continuous pick” (selección por el usuario). Cada fase marcada se guarda en formato de ReflexW y es necesario colocar la velocidad del medio. Además, debe indicarse el número de capa, lo cual es muy importante al momento de evaluar pavimentos, en donde se evalúan varias capas a la vez.
5. ReflexW tiene la opción de crear un “layer show” (esquema de sección transversal de las interfaces dibujadas), en el cual deben elegirse las selecciones guardadas anteriormente que se quieran analizar. En éste se visualizan las capas, a las cuales pueden asignárseles colores específicos para representar el material de la capa. Para obtener los valores numéricos de los espesores se puede crear un reporte y exportarlo en Excel.
6. Analizar los módulos de resiliencia correspondientes a cada capa y definir el estado de los mismos. Si se requiere, recomendar algún tipo de tratamiento según el problema observado.

XI. ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES EFECTUADAS CON EL GEORADAR Y OTROS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

A. Pavimentos flexibles

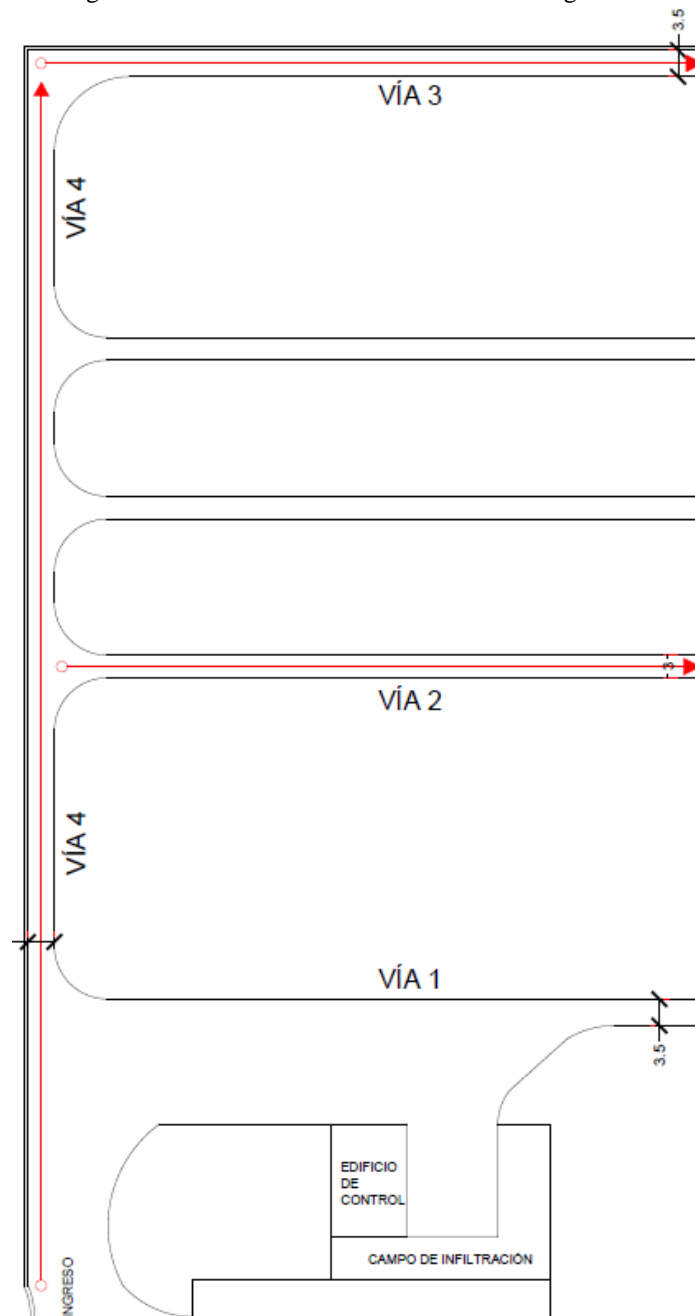
1. Planta de energía eléctrica. El proyecto analizado es una planta de energía eléctrica que se encuentra en Palín, Escuintla, cuyas vías están compuestas de una carpeta asfáltica y una base de material de relleno. El objetivo era determinar los espesores de la carpeta y la base con la técnica no destructiva del georadar para supervisar que se cumpliera el diseño previsto.

Figura No. 13. Ubicación proyecto y tramos analizados.



Fuente: Google Earth

Figura No. 14. Plano de vías analizadas con el georadar.



Fuente: Elaboración propia

En esta ocasión el georadar se utilizó como una herramienta complementaria a la extracción de núcleos, de los cuales se realizaron tres. A continuación, se muestran los radargramas tomados directamente sobre las pruebas destructivas y los valores de carpeta de las mismas. Los valores obtenidos por el georadar son un promedio de espesores, pues se tomó un tramo largo que iba sobre el testigo y el

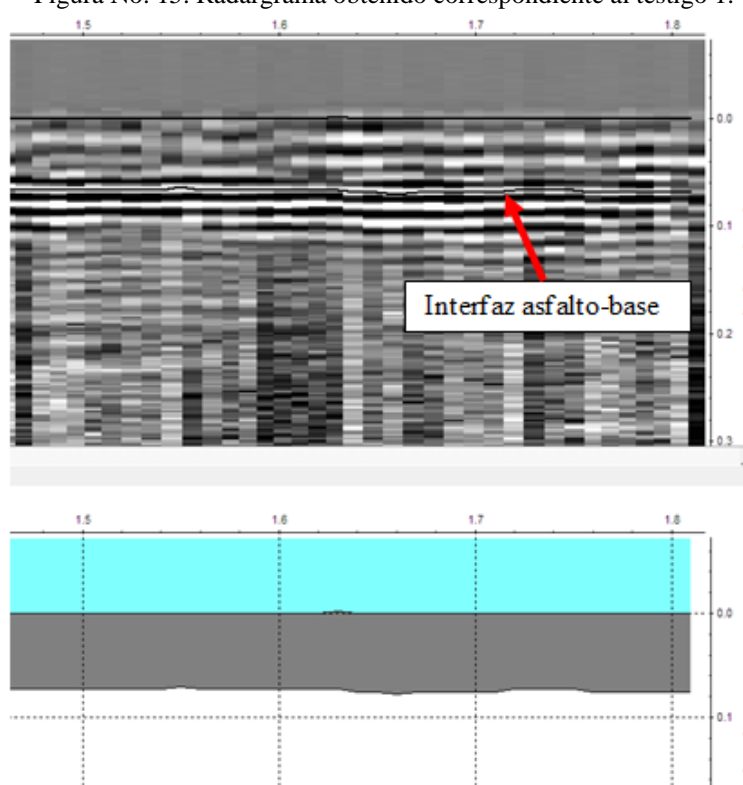
equipo toma datos a cada 10 milímetros. Sin embargo, puede observarse que se acercan mucho al valor del núcleo extraído.

Cuadro No. 10. Espesores de carpeta obtenidos por medio de la extracción de núcleos y por el georadar.

No. Testigo	Espesor (cm)	GPR (prom)
1	7.50	7.53
2	8.00	8.06
3	8.50	8.41

Fuente: Elaboración propia

Figura No. 15. Radargrama obtenido correspondiente al testigo 1.

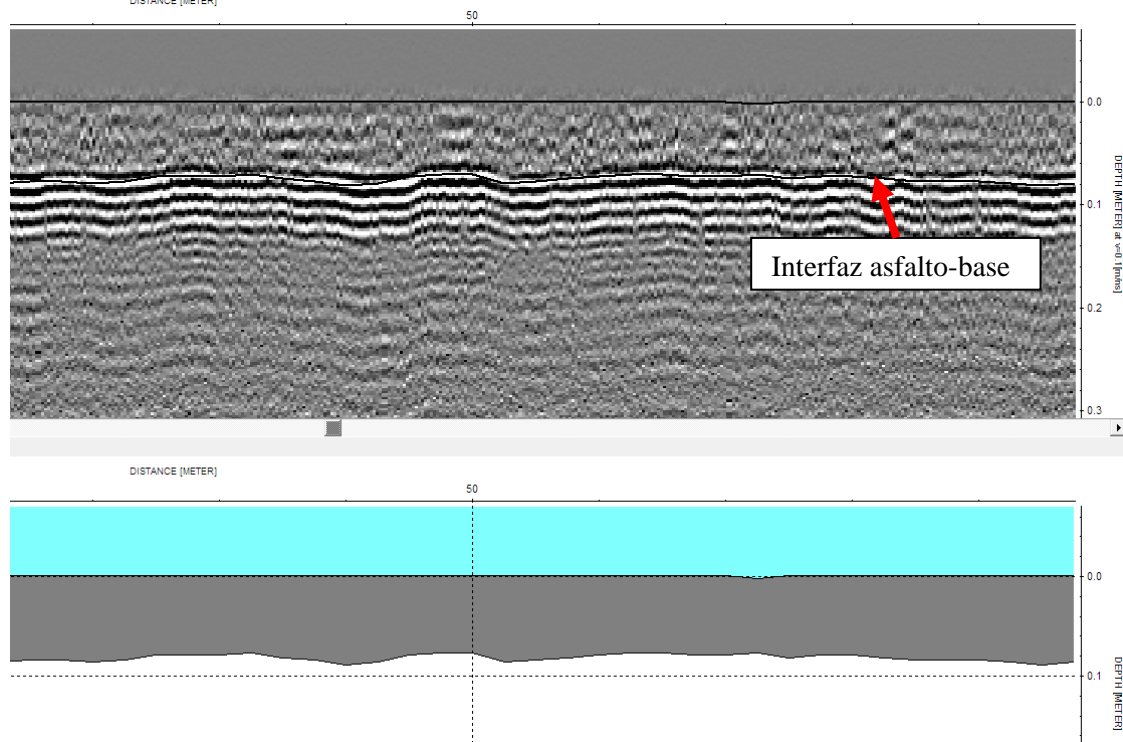


Fuente: Elaboración propia

Como se observa en el Cuadro No. 10, los espesores de carpeta obtenidos por medio del georadar son muy similares al de los núcleos, lo cual asegura que la interpretación de datos es correcta y que el equipo está trabajando adecuadamente. En la Figura No. 15 puede visualizarse la opción “layer show” del programa ReflexW, la cual es la gráfica que se encuentra bajo el radargrama y muestra una sección de las capas definidas, siendo la celeste la capa de aire entre la antena y la superficie de estudio y la gris la de

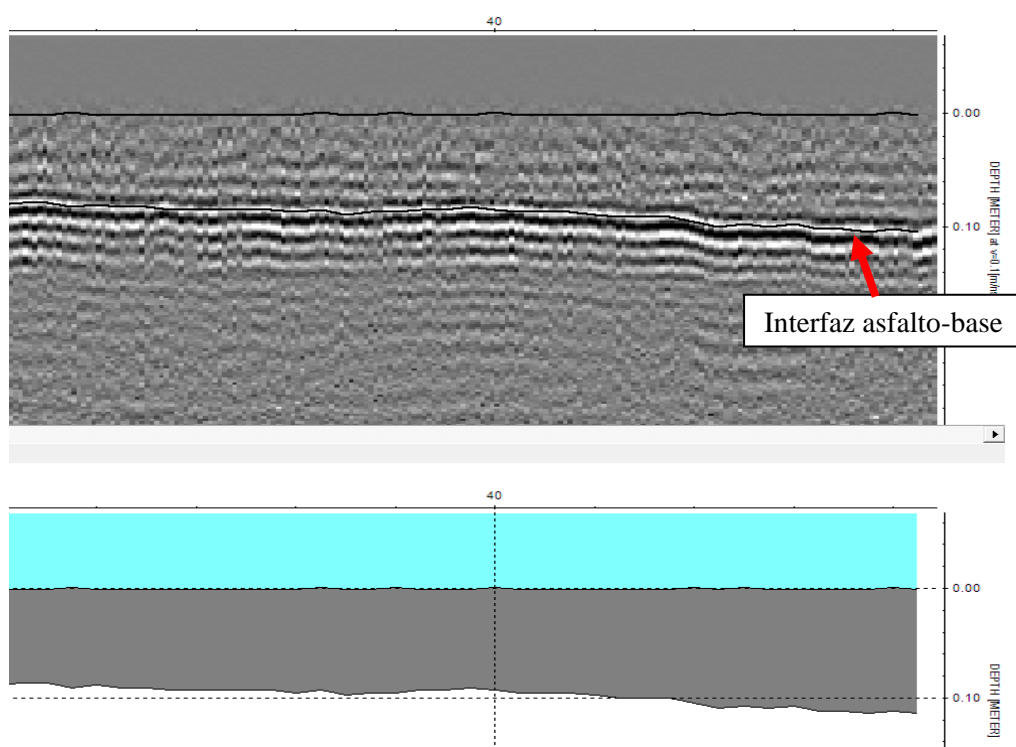
concreto asfáltico. Esta fue hecha con un intervalo específico, es decir, que los datos serán promediados según este intervalo, que en este caso son cada 10 centímetros.

Figura No. 16. Parte de radargrama de la vía 2, espesor de la carpeta.



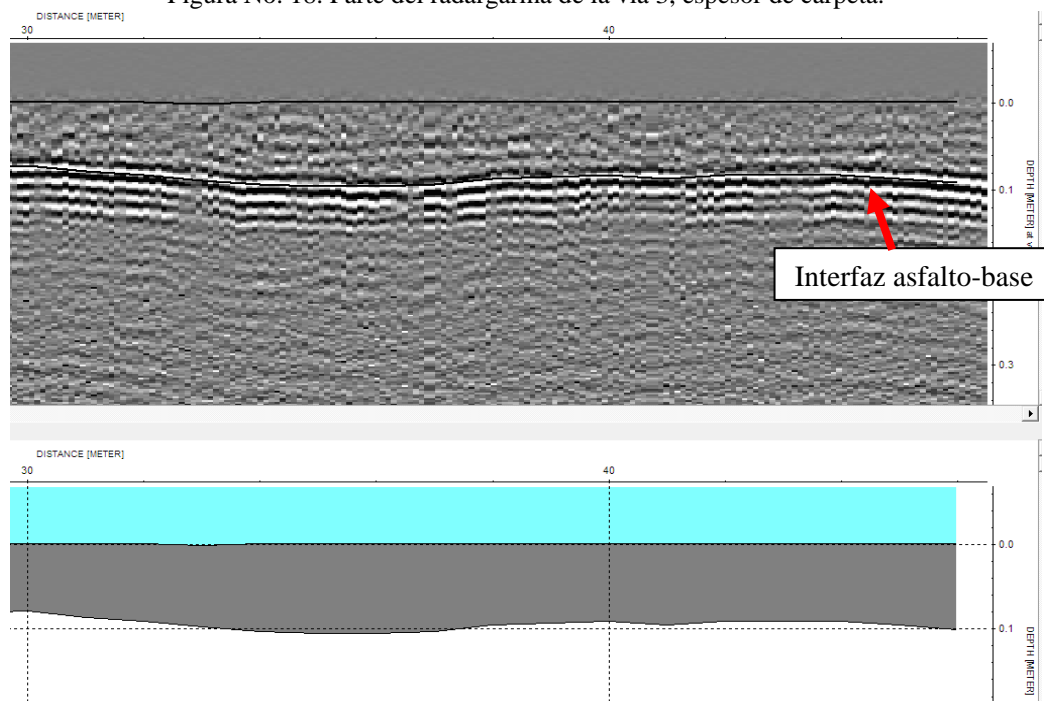
Fuente: Elaboración propia

Figura No. 17. Parte del radargrama de la vía 4, espesor de carpeta.



Fuente: Elaboración propia

Figura No. 18. Parte del radargrama de la vía 3, espesor de carpeta.

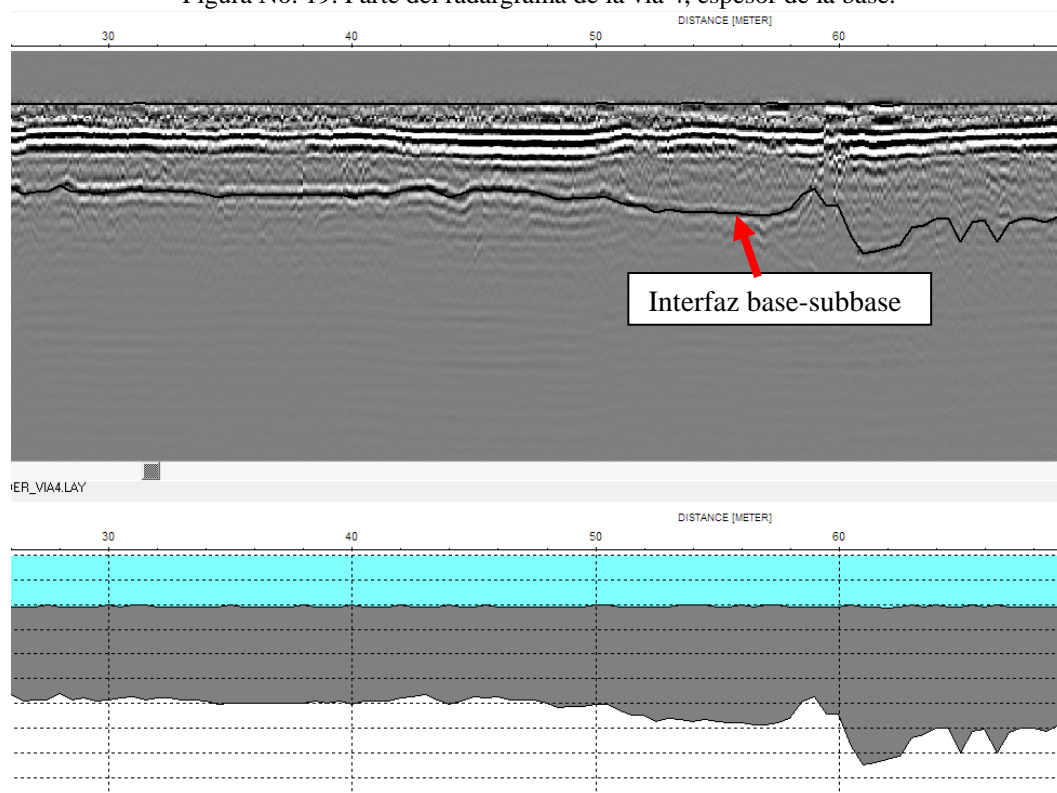


Fuente: Elaboración propia

En los radargramas se visualiza que la interfaz de la carpeta con la base es representada por la primera línea blanca definida, pues es ahí en donde ocurre el cambio de constantes dieléctricas. La constante dieléctrica típica del asfalto es 3 y la de una arena seca no saturada es 6 (ver Cuadro No. 6 y Ecuación No. 1), en este caso la polaridad de la señal sería positiva, lo cual concuerda con lo obtenido en el radargrama, en donde la polaridad positiva está representada por la fase de color blanco.

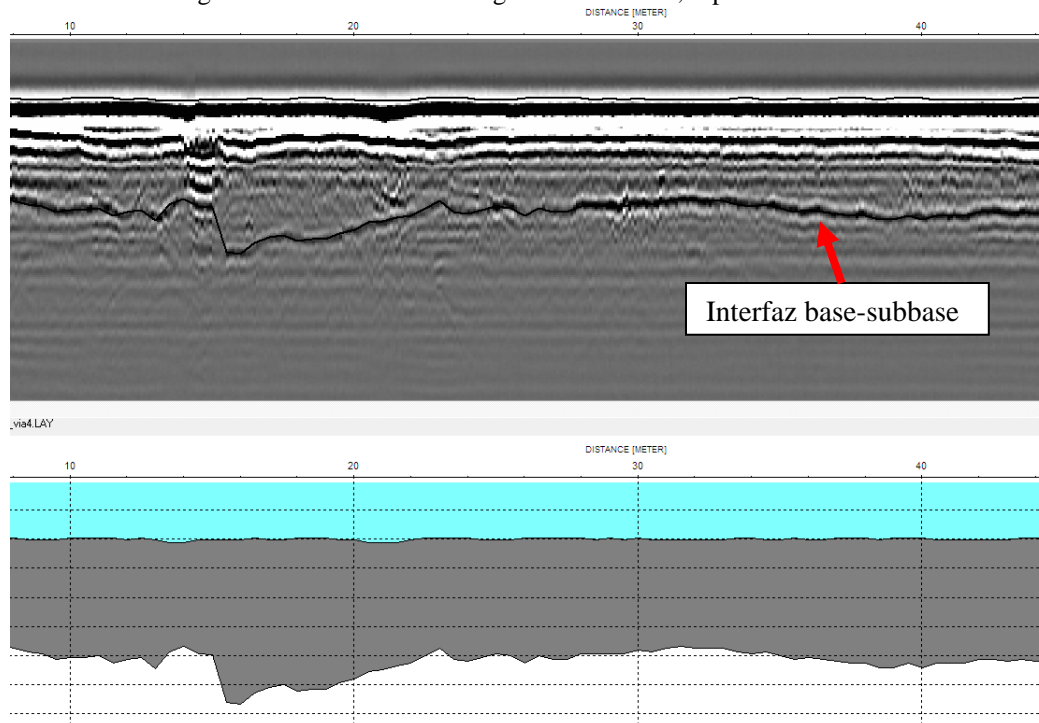
Para la determinación de la base es necesario utilizar los archivos generados por la antena de menor frecuencia, pues se encuentra a mayor profundidad. Puede visualizarse en los siguientes radargramas que la polaridad de la señal es negativa, pues como la constante dieléctrica para la base mencionada anteriormente es 6 y para la subbase una de 5 por ser materiales rocosos, el valor de polaridad obtenido es negativo (Ecuación No. 1 y Cuadro No. 6). En los radargramas puede notarse que en algunos tramos la fase no es tan definida como en otros, lo cual puede deberse a la migración de finos, lo cual ocasiona que las constantes dieléctricas cambien y no haya un contraste significativo entre ellas. Es importante recalcar que en este radargrama puede observarse también la carpeta asfáltica, sin embargo, tiene una mayor resolución y exactitud los obtenidos mediante la antena de alta frecuencia.

Figura No. 19. Parte del radargrama de la vía 4, espesor de la base.



Fuente: Elaboración propia

Figura No. 20. Parte del radargrama de la vía 2, espesor de la base.



Fuente: Elaboración propia

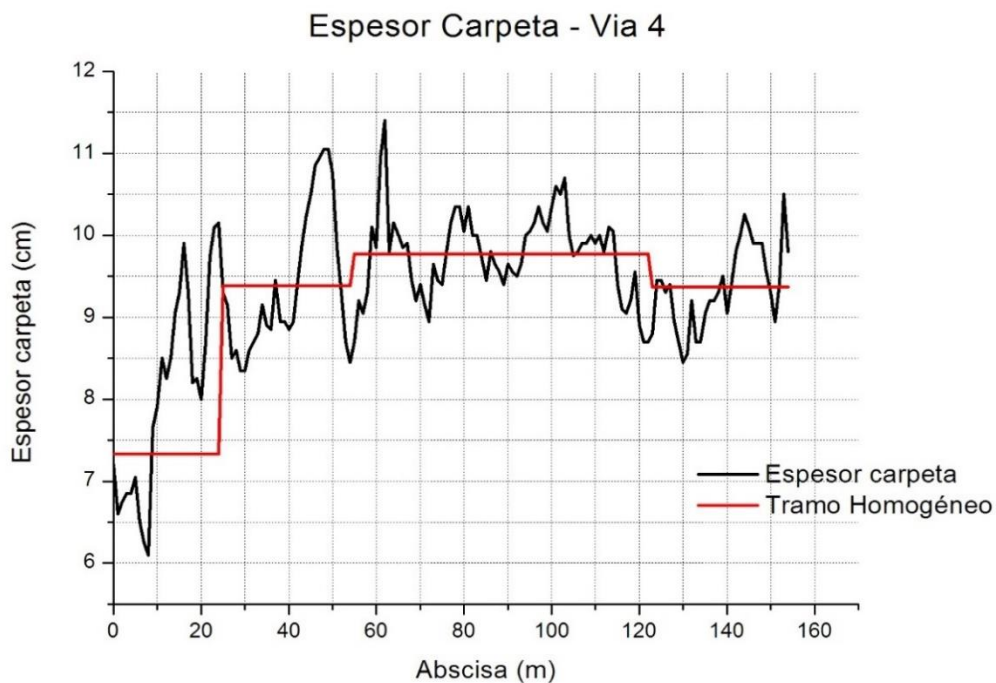
Al ya tener las interfaces definidas, se realizaron tramos homogéneos para la base y carpeta en las diferentes vías. El diseño original del pavimento era a 20 años y se requería un espesor de carpeta de 8 centímetros uniformemente en todas las vías con una base de más de 30 centímetros. Como puede verse en el Cuadro No. 11, los espesores de carpeta cumplen con lo previsto en el diseño, pues son mayores a 8 centímetros. Solamente el primer tramo de la vía 4 es menor a este valor, lo cual se debe a que en esa parte de la vía se encuentra la entrada de vehículos que anteriormente era de terracería. Sin embargo, este valor puede considerarse aceptable, pues no está tan alejado del valor necesario. Además, puede verse que la base tiene valores mayores a los 30 centímetros especificados, lo cual aporta más resistencia al pavimento. En la vía 2 y 3 se tienen valores menores a 30 centímetros, sin embargo la longitud de estos tramos no es significativa y se tienen valores mayores a 8 centímetros para la carpeta. Según los espesores que se tienen en campo, la construcción sí cumple con los parámetros de diseño.

Cuadro No. 11. Espesores de carpeta y de base para los diferentes tramos homogéneos de las vías.

Espesor prom (cm)		
TRAMO	Carpeta	Base
Vía 4		
1	7.33	44.89
2	9.38	42.26
3	9.77	40.21
4	9.37	39.09
Vía 2		
1	8.55	28.92
2		36.12
3		33.74
Vía 3		
1	10.19	32.90
2		31.69
3	10.10	29.63
4		32.75

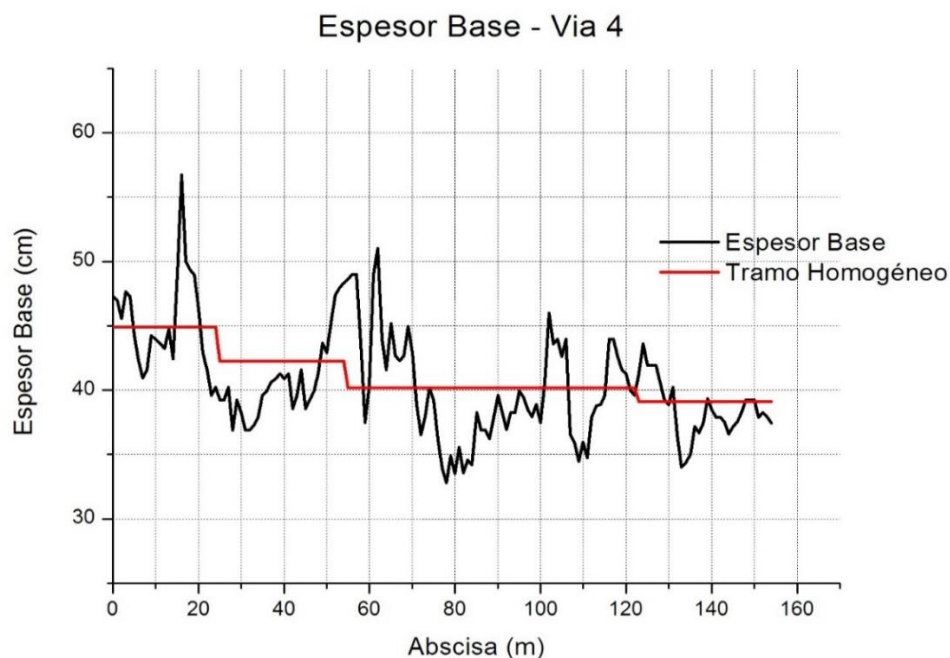
Fuente: Elaboración propia

Figura No. 21. Ejemplos de tramos homogéneos para la carpeta de la vía 4.



Fuente: Elaboración propia

Figura No. 22. Ejemplos de tramos homogéneos para la base de la vía 4.



Fuente: Elaboración propia

A pesar de que el pavimento cumpla con los espesores dictados en el diseño, es posible que otros parámetros, como el módulo de pavimento y los módulos elásticos de las capas no sean suficientes para un diseño a 20 años. Por lo tanto, se obtuvo el promedio de espesores de cada una de las vías para poder calcular estos parámetros de manera más representativa.

El primer paso a realizar sería analizar la deflexión máxima (obtenida por medio del deflectómetro) con el área del cuenco de deflexiones (método WSDoT), ya que este refleja a grandes rasgos cómo se está comportando la carpeta y la base del pavimento. Para cada vía se calculó un promedio de deflexiones y de áreas obteniendo así los resultados mostrados en el Cuadro No. 12. Según los valores ASD y el Cuadro No. 7, la subrasante de todas las vías es fuerte, por lo que se esperaría obtener módulos de elasticidad altos. Mientras que la carpeta puede clasificarse como normal según el área del cuenco de deflexiones.

Cuadro No. 12. Promedio de deflexiones y áreas de cuenco de deflexiones para cada vía y su correspondiente interpretación.

Vía	ACD (μm^2)	Conclusión	Pavimento	Deflexión máx prom(μm)	Conclusión	Subrasante
4	371.97	Medio	Normal	348.86	Baja	Fuerte
2	374.22	Medio	Normal	520.21	Baja	Fuerte
3	406.30	Medio	Normal	428.29	Baja	Fuerte

Fuente: Elaboración propia

Es de suma importancia obtener los módulos de elasticidad de cada capa, pues se debe poder identificar qué capas aportan mayor resistencia. Estos módulos se obtuvieron por medio del método WSDoT, el cual define las Ecuaciones No. 2, 3 y 4 que requieren los espesores de la base y de la carpeta. En la Figura No. 21 puede visualizarse que solamente en la vía 4 existen cuatro tramos homogéneos, por lo que se necesitarían cuatro extracciones de núcleo para saber aproximadamente los espesores y poder calcular los módulos de elasticidad de las capas del pavimento. Con el georadar se obtienen valores de espesores más reales y por consiguiente módulos de elasticidad más exactos y representativos, lo cual nos lleva a un mejor control de calidad.

Para calcular los módulos de elasticidad de cada vía se utilizaron los espesores promedio de la carpeta y la base respectivos a cada tramo homogéneo. Se obtuvieron entonces varios valores para los módulos. Sin embargo, se analizó solamente el valor más pequeño, pues mientras menores sean los módulos de elasticidad, menor será la capacidad del pavimento a recuperarse después de que pase la carga repetidamente; es decir que este módulo sería el crítico del tramo. Si comparamos los valores obtenidos con los del Cuadro No. 4 se puede ver que los módulos cumplen con los valores esperados según el material. Para la subrasante se tiene una arena limosa. En este caso, la base está constituida por material de relleno, el cual está compuesto principalmente de grava y arena. Para este tipo de suelo se tienen módulos de elasticidad entre 70 a 211 MPa, lo cual cumple con los obtenidos. La carpeta asfáltica tiene módulos elevados a comparación con las otras capas, lo cual tiene sentido, pues esta es la capa que recibe directamente la carga del tránsito. Estos valores de módulo de resiliencia de la carpeta son aceptables y sí cumplen con los requisitos del diseño. Todos los módulos mostrados en el cuadro son los menores de todo el tramo, por lo tanto, se tiene por seguro que los demás sí cumplen e incluso son mayores que los valores esperados.

Cuadro No. 13. Valores mínimos de módulos resilientes de la subrasante y la carpeta asfáltica para cada vía.

Vía	Módulo de resiliencia subrasante (MPa)	Módulo de elasticidad base (Mpa)	Módulo de resiliencia carpeta (MPa)
4	125.40	263.00	1,502.76
2	114.46	161.28	1,459.12
3	97.08	200.73	1,456.79

Fuente: Elaboración propia

En el Cuadro No. 13 puede notarse también, que cada capa tiene mayor módulo de resiliencia que la anterior, esto se debe a que por la transferencia de carga que existe entre ellas, las capas más cercanas a la aplicación de la misma serán las más solicitadas y deberán tener un módulo de elasticidad mayor. Asimismo, puede verse que todos los módulos de la vía 4 son mayores a los de las demás vías, lo cual se debe a que ésta era la principal y estaba destinada a aguantar la mayoría de vehículos.

El módulo de pavimento da una visión global del comportamiento en conjunto de todas las capas del pavimento. Los valores obtenidos para cada tramo se muestran en el Cuadro No. 14.

Cuadro No. 14. Valores obtenidos de Módulo de pavimento.

Vía	Ep (Mpa)
4	386.74
2	260.84
3	352.30

Fuente: Elaboración propia

Además, se calculó el número estructural de los tramos para verificar si éstos son capaces de soportar los esfuerzos aplicados. Como puede observarse en el Cuadro No. 15, en todos los casos la base tiene un número estructural mayor al de la carpeta, lo cual se debe a que su espesor es mayor. Esto refleja que existe una buena transferencia de carga, pues la base sí aporta estructuralmente a la resistencia del pavimento. Los SN totales son casi el doble de los SN requeridos, por lo tanto, puede decirse que las capas del pavimento resistirán de manera efectiva las cargas que se esperan para todos los tramos. Es importante recalcar que el SN requerido es bajo porque el pavimento no es muy transitable y no se esperan que camiones o vehículos muy pesados pasen sobre el mismo con frecuencia.

Cuadro No. 15. Valores de números estructurales para cada vía.

Vía	SN Carpeta	SN Base	SN total	SN requerido
4	1.30	1.48	2.78	1.07
2	1.16	1.29	2.45	1.36
3	1.14	1.55	2.69	1.30

Fuente: Elaboración propia

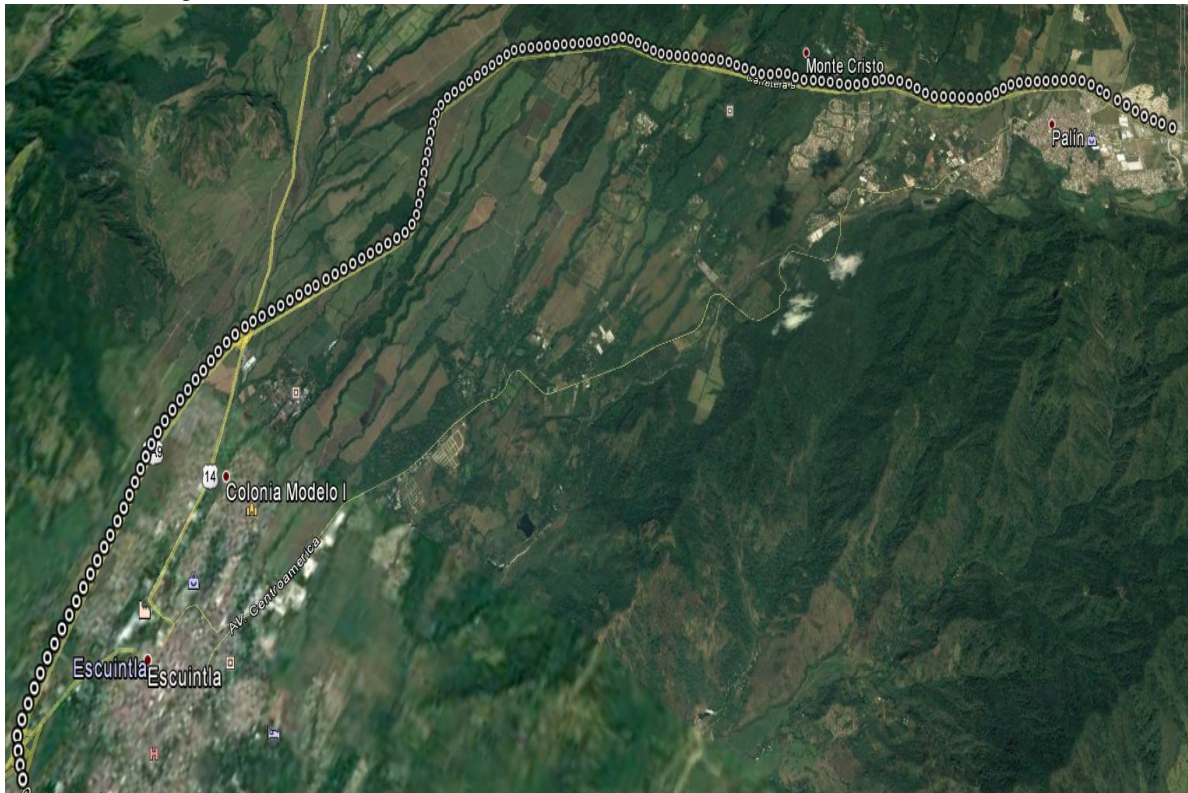
Lo importante de separar las capas y analizar su comportamiento y su aporte estructural es saber la causa de cualquier grieta que aparezca en la superficie del pavimento, ya que así puede tratarse la capa que está ocasionando los problemas.

Según la Figura No. 3, para un número estructural aproximadamente de 2.6 y un espesor total de casi 18 pulgadas se espera un módulo de pavimento de 25,000 libras por pulgadas cuadradas, es decir 172.41 MPa. Si se observa el Cuadro No. 14, todos los valores obtenidos de E_p son mayores a este valor, por lo que se puede afirmar que el pavimento sí trabaja en conjunto y que su construcción y materiales fueron los adecuados.

Para finalizar, se concluye que el pavimento construido tiene las propiedades adecuadas para tener una vida útil de 20 años, ya que los espesores de la base y la carpeta son mayores que lo estipulado en el diseño y los módulos de elasticidad son valores altos que reflejan que el pavimento tiene una buena capacidad para amortiguar los efectos de las cargas repetidas. Igualmente, los números estructurales existentes son casi el doble que los necesarios, lo cual concuerda con todo lo descrito anteriormente.

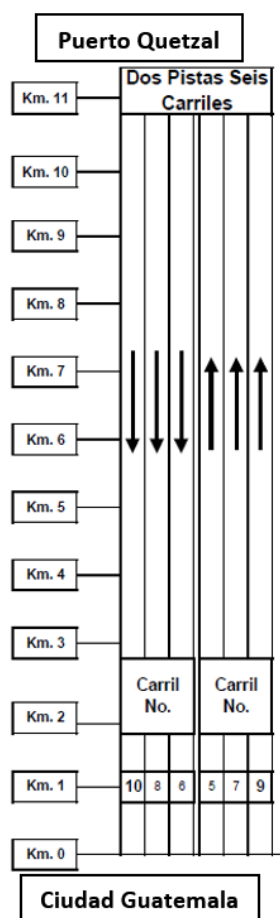
2. Autopista Palín-Escuintla. En el siguiente caso se evaluaron tres carriles de la carretera Palín Escuintla, la cual está conformada por un pavimento flexible. Para los tres carriles se analizaron los espesores de las capas que componen el pavimento (carpeta, base y subbase) y sus módulos de resiliencia correspondientes. En las siguientes imágenes puede observarse la ubicación del proyecto y la nomenclatura de carriles a utilizar a lo largo de esta discusión. Los carriles analizados fueron los número 7, 8 y 10, teniendo los primeros dos una longitud de 23 kilómetros y el 10, por ser el carril de ascenso, una de 15 kilómetros. Según el diseño original, la carpeta asfáltica debía de tener un espesor mínimo de 20 centímetros. Es importante mencionar que en esta carretera se han estado realizando trabajos menores para el mejoramiento de la percepción del usuario.

Figura No. 23. Ubicación de carriles analizados en carretera Palín - Escuintla.



Fuente: Google Earth

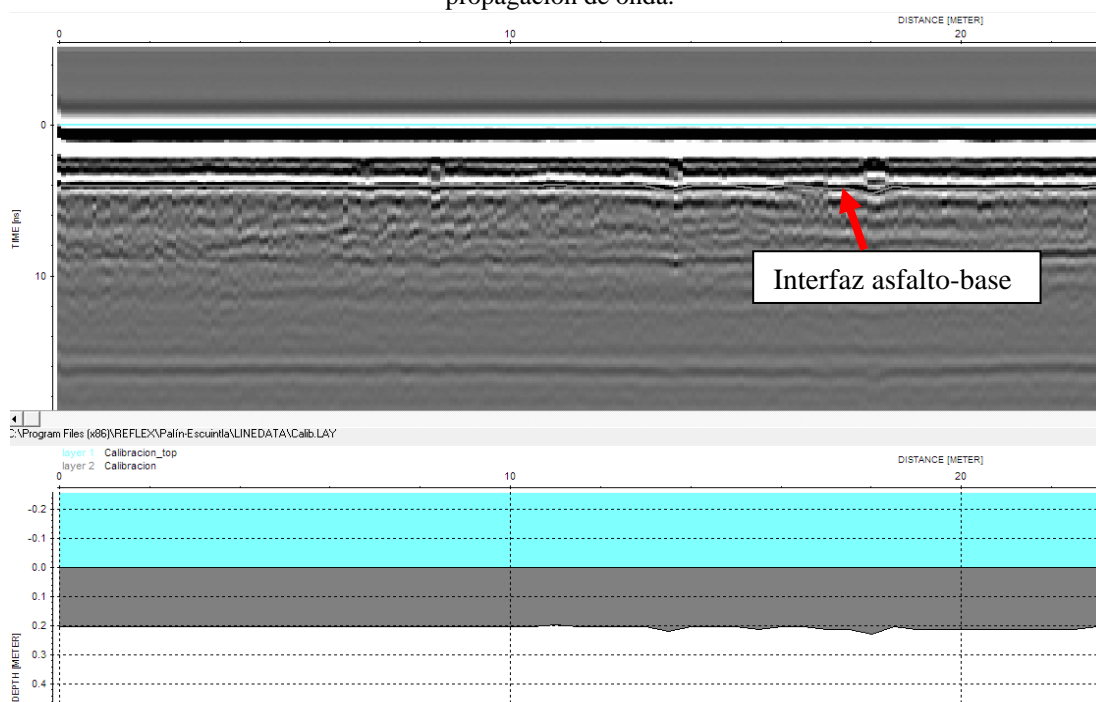
Figura No. 24. Nomenclatura de carriles utilizada.



Fuente: Elaboración propia

Como no se contaban con extracciones de núcleo recientes, lo primero a realizar fue una calicata para determinar el espesor exacto de la carpeta asfáltica, el cual fue de 20 centímetros. Sobre ésta se pasó el georadar, se identificó claramente la fase que representaba la carpeta y se estableció la velocidad de propagación de onda correspondiente a este material (0.10 m/ns). El radargrama obtenido sobre la calicata (Figura No. 25) asegura que la interpretación de datos sea correcta y confiable.

Figura No. 25. Radargrama utilizado para determinar la fase de la carpeta y su respectiva velocidad de propagación de onda.

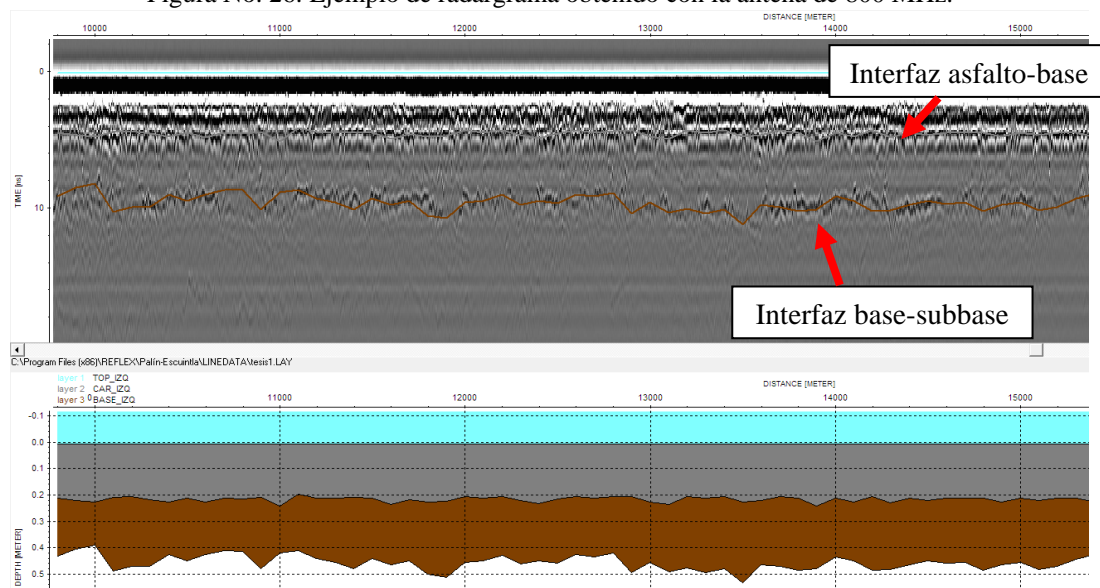


Fuente: Elaboración propia

Como la carpeta asfáltica tenía un espesor de aproximadamente 22 centímetros, lo cual es un espesor grande, se utilizaron dos antenas de baja frecuencia. Para determinar los espesores de la carpeta y la base se usó la antena de 800 MHz, mientras que para la subbase la antena de 500 MHz. Se tomaron datos a cada 30 centímetros con la opción de “AutoStack”, la cual establece automáticamente la más alta resolución posible según la velocidad en la que vaya el carretón. En este caso, se iba a una velocidad promedio de 40 kilómetros por hora, con la cual se obtuvieron radargramas con una resolución alta.

Es importante mencionar que la constante dieléctrica depende de varias características del material de análisis, como su densidad, su contenido de humedad, la temperatura, etc. Por lo tanto, en cada proyecto se tendrán diferentes constantes dieléctricas aunque se traten de la misma familia de materiales. El siguiente radargrama corresponde a la medición con la antena de 800 MHz, en el cual pueden observarse dos fases definidas. En este caso, la fase de la carpeta asfáltica es negativa, representada por el color negro, lo cual quiere decir que el asfalto tiene una mayor constante dieléctrica que la base. El mismo argumento se tiene para la interfaz base-subbase. En los radargramas puede notarse que en algunos tramos la interface base-subbase no es tan definida como en otros, lo cual puede deberse a la migración de finos, ocasionando que las constantes dieléctricas cambien y no haya un contraste significativo entre ellas.

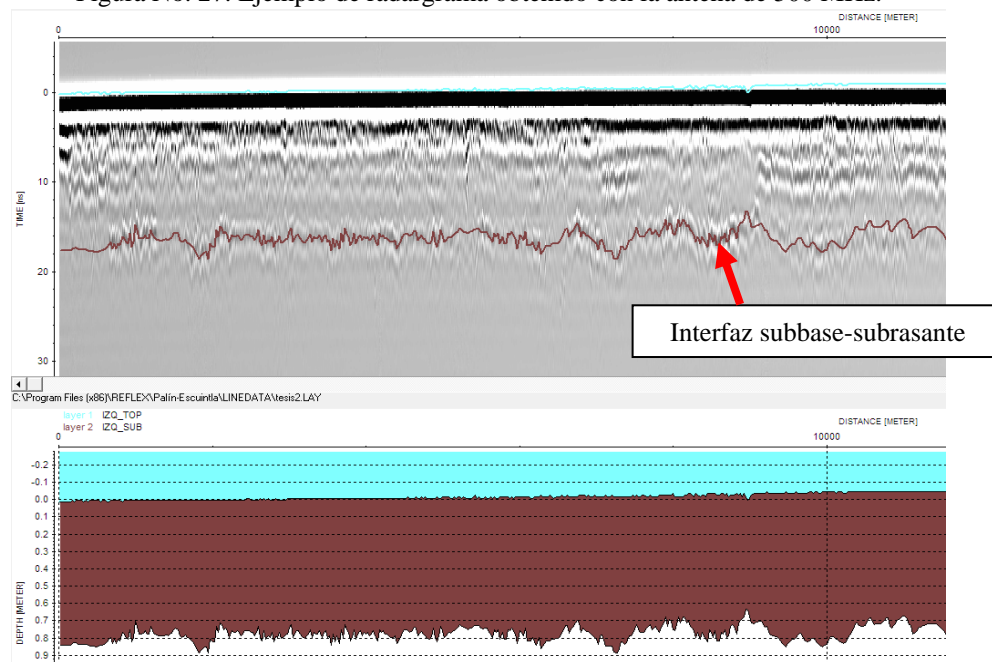
Figura No. 26. Ejemplo de radargrama obtenido con la antena de 800 MHz.



Fuente: Elaboración propia

Para la interfaz subbase-subrasante se necesitó utilizar una antena de menor frecuencia para alcanzar una profundidad de casi 1 metro. Esta fase negativa puede verse claramente en el radargrama a continuación.

Figura No. 27. Ejemplo de radargrama obtenido con la antena de 500 MHz.



Fuente: Elaboración propia

Según los espesores de carpetas obtenidos se realizaron tramos homogéneos para todos los carriles, incluyendo todas las capas del pavimento, para calcular los módulos resilientes de las mismas de manera más precisa. Como puede verse en las siguientes tablas, el espesor de carpeta cumple para mayoría de tramos, siendo este de 22 centímetros o más. Sin embargo, existe un tramo en los carriles analizados pertenecientes a la calzada izquierda (dirección Puerto Quetzal a Guatemala) que tienen un espesor de carpeta de 21 centímetros. Es importante recalcar que dentro de estos tramos se incluye el kilómetro 52, en el cual se encuentran las casetas del peaje, en donde tienden a haber mayores irregularidades por el proceso constructivo de las mismas. En la Figura No. 28 pueden observarse los tramos homogéneos realizados.

Con respecto al espesor de la base, originalmente se tenían bases con espesores promedio de 26 y 27 centímetros. Si se compara estos valores con los de las tablas puede verse que su espesor ha disminuido entre 2 y 3 centímetros, lo cual puede deberse a la migración de finos o al proceso de construcción. Sin embargo, todos los valores de espesor de base se encuentran por arriba de los 20 centímetros, lo cual asegura que su aporte de resistencia a la estructura de pavimento sigue siendo relevante. Además, esta base se encuentra sobre una subbase gruesa con espesores mayores a 33 centímetros, brindando así un gran soporte a la estructura de pavimento.

Cuadro No. 16. Espesores de capas del carril #7.

CARRIL #7				
Estación		Espesores (m)		
Inicio	Final	Carpeta	Base	Subbase
38.000	44.600	0.23	0.25	0.35
44.600	51.600	0.22	0.24	0.35
51.600	55.600	0.22	0.24	0.33
55.600	61.000	0.22	0.24	0.33

Fuente: Elaboración propia

Cuadro No. 17. Espesores de capas del carril #8.

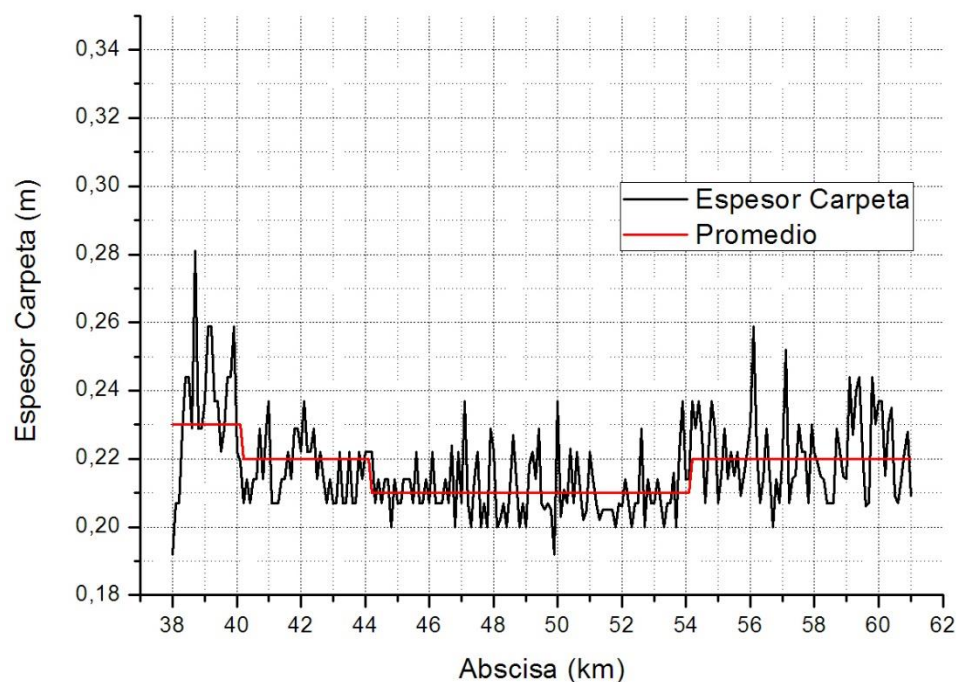
CARRIL #8				
Estación		Espesores (m)		
Inicio	Final	Carpeta	Base	Subbase
38.000	40.100	0.23	0.24	0.35
40.100	44.100	0.22	0.26	0.34
44.100	54.100	0.21	0.24	0.35
54.100	61.000	0.22	0.24	0.33

Fuente: Elaboración propia

Cuadro No. 18. Espesores de capas del carril #10.

CARRIL #10				
Estación		Espesores (m)		
Inicio	Final	Carpeta	Base	Subbase
39.300	42.100	0.22	0.25	0.39
42.100	47.100	0.22	0.25	0.37
47.100	50.100	0.22	0.23	0.36
50.100	54.000	0.21	0.21	0.38

Fuente: Elaboración propia

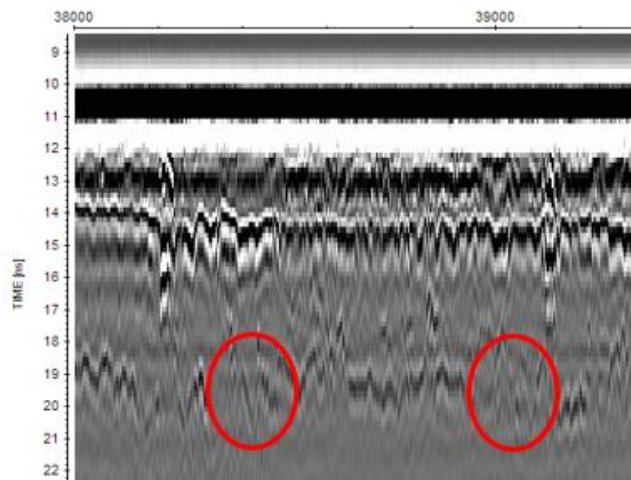
Figura No. 28. Ejemplo de los tramos homogéneos para la carpeta del carril #8.
Espesor Carpeta Carril #8

Fuente: Elaboración propia

Se encontró que efectivamente la base se ha ido contaminando con finos de la subrasante en el carril #7. Esta migración de finos se ve representada en los radargramas por medio de partes de la fase menos definidas que el resto. Esto se debe a que, al mezclarse los materiales, el contraste entre las constantes dieléctricas entre la base y subbase ya no es tan marcado (Figura No. 27). Además, se localizó que en el área del peaje se tienen muchas irregularidades en la carpeta, pues la fase no puede verse tan

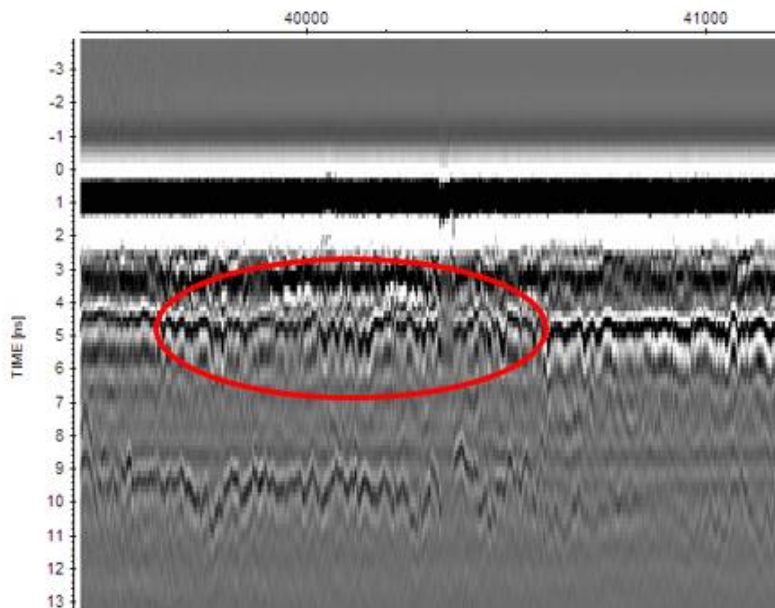
definida como el resto y se ven algunas hipérbolas angostas que podrían representar grietas en la base (Figura No. 30).

Figura No. 29. Migración de finos a la base en carril #7 en tramo km 38+000 al 39+351.



Fuente: Elaboración propia

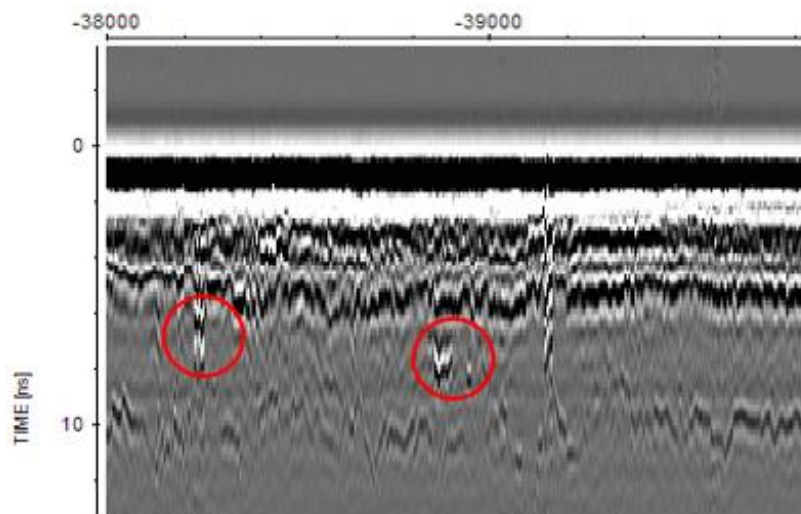
Figura No. 30. Irregularidades en carpeta asfáltica por peaje en carril #7 tramo km 40+701 al 43+701.



Fuente: Elaboración propia

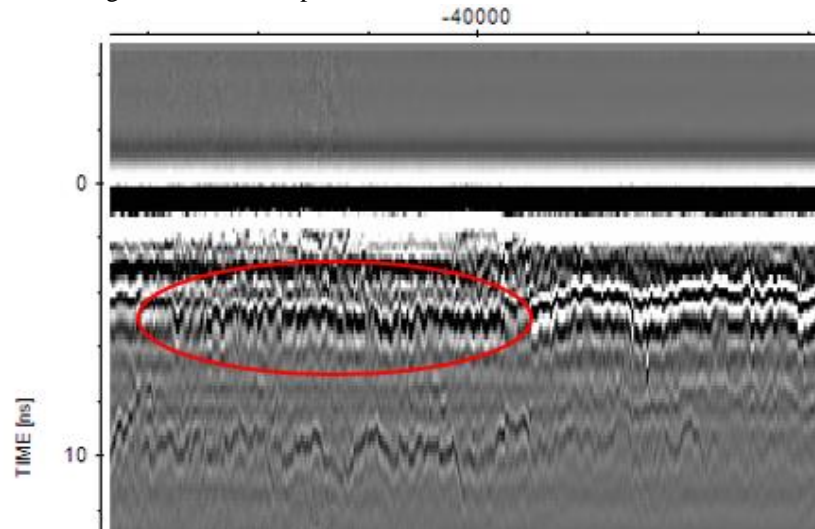
Asimismo, se encontraron anomalías en la base del carril #8 al principio del tramo (km 38+000 al 39+351). En la Figura No. 31 puede observarse que existen dos puntos en donde hay una pequeña fase bien definida por debajo de la carpeta, los cuales pueden significar que la base posee un alto contenido de humedad en estos puntos. Estos incluso podrían representar vacíos llenos de agua, para saberlo con certeza se necesitaría un ensayo destructivo en estos puntos. Además, en el carril #10 se detectaron irregularidades en la carpeta asfáltica dentro del tramo comprendido del kilómetro 40+377 al 40+975 (ver Figura No. 32). En el radargrama se observa que dentro de este tramo la fase de la carpeta no se ve tan definida como el resto, lo cual refleja las irregularidades de la misma.

Figura No. 31. Alto contenido de humedad en la base en carril #8 en tramo km 38+000 al 41+073.



Fuente: Elaboración propia

Figura No. 32. Irregularidades en carpeta asfáltica en el carril #10 tramo km 40+377 al 40+975.



Fuente: Elaboración propia

Aunque el pavimento tenga espesores de capas correctos según su diseño, debe evaluarse la condición estructural del mismo para asegurar su correcto funcionamiento. Esta evaluación estructural se realizó con el deflectómetro de impacto y se calcularon los módulos de elasticidad de la subrasante y el módulo de pavimento en función de los espesores previamente obtenidos por el georadar. Al igual que ejemplo anterior, los módulos se obtuvieron por medio del método WSDoT, el cual define las Ecuaciones 3, 4 y 5. Ya obtenidos los módulos correspondientes a cada espesor promedio, se realizaron de nuevo tramos homogéneos por carril. Para este caso se tiene 23 kilómetros de carretera, por lo que analizar solamente el módulo más pequeño no sería representativo. En las siguientes tablas pueden observarse los valores de módulos de resiliencia de la subrasante para los diferentes tramos homogéneos. Para todos los carriles se analizará el percentil 85, el cual consiste del promedio menos desviación estándar, pues mientras menor sea el módulo más crítico será el mismo. En general, los módulos de resiliencia de la subrasante se encuentran aproximadamente en un rango de 30 a 60 MPa, por lo tanto, podría clasificarse a la subrasante como una arena arcillosa (ver Cuadro No. 4). Asimismo, se calcularon los números estructurales del pavimento para encontrar la capacidad actual del mismo.

Cuadro No. 19. Módulo de resiliencia de la subrasante en tramos homogéneos del carril #7.

Módulo de resiliencia de la subrasante en carril #7					
Tramo		Promedio (Mpa)	STD (Mpa)	Percentil 85 (Mpa)	Coef. Var.
Inicio	Final				
38.000	39.351	41.42	10.51	30.91	25.4%
39.351	40.701	94.81	26.65	68.16	28.1%
40.701	43.701	71.08	33.13	37.95	46.6%
43.701	48.654	61.37	17.99	43.38	29.3%
48.654	49.858	100.56	20.49	80.06	20.4%
49.858	53.151	43.36	12.74	30.62	29.4%
53.151	60.951	53.11	14.79	38.31	27.9%

Fuente: Elaboración propia

Cuadro No. 20. Módulo de pavimento en tramos homogéneos del carril #7.

Módulo de pavimento en carril #7					
Tramo		Promedio (MPa)	STD (MPa)	Percentil 85 (MPa)	Coef. Var.
Inicio	Final				
38.000	39.351	421.73	79.11	342.62	18.8%
39.351	41.154	723.91	137.61	586.30	19.0%
41.154	45.652	485.32	218.91	266.40	45.1%
45.652	50.002	751.28	161.52	589.76	21.5%
50.002	51.951	648.30	64.25	584.05	9.9%
51.951	60.951	509.53	148.75	360.78	29.2%

Fuente: Elaboración propia

Cuadro No. 21. Número estructural en tramos homogéneos del carril #7.

Número estructural en carril #7					
Tramo		Promedio	STD	Percentil 85	Coef. Var.
Inicio	Final				
38.000	39.801	5.22	0.32	4.89	6.2%
39.801	41.154	6.25	0.42	5.83	6.7%
41.154	45.652	5.38	0.81	4.57	15.0%
45.652	52.101	6.17	0.60	5.57	9.7%
52.101	60.951	5.93	0.56	5.37	9.4%

Fuente: Elaboración propia

En el Cuadro No. 19 puede observarse que para el tramo del carril #7, del kilómetro 40+701 al 43+701, se tiene el coeficiente de variación más alto, acercándose al 50%. Asimismo, en los Cuadros No. 20 y 21, puede notarse que el tramo del kilómetro 41+154 al 45+652 tiene un coeficiente de variación alto y el módulo de pavimento y número estructural más bajos. Esto puede deberse a que dentro de estos tramos se encuentra el peaje. En el radargrama se observó que la carpeta bajo el peaje tiene irregularidades e incluso grietas en la base. Esto puede deberse a que en este lugar se tienen mayores solicitaciones, pues los vehículos frenan constantemente en esta zona y además permanecen parados un tiempo, esto ocasiona que la estructura de pavimento se debilite más rápidamente (ver figuras No. 33 y 34). Además, los valores de los módulos, tanto de la subrasante como de pavimento, y el número estructural más bajos están en los tramos iniciales, en donde se encontró que la base estaba contaminada por finos (Figura No. 27). Esta migración de finos disminuye el aporte estructural de la base por las características de los mismos, lo cual provoca que el módulo de pavimento sea bajo en estos tramos. Esta

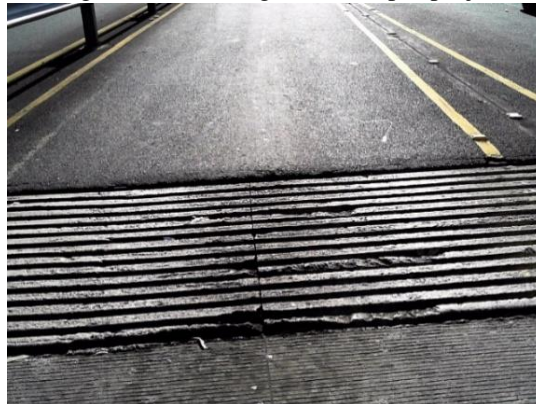
pérdida de resistencia estructural puede observarse también en el número estructural, el cual es bajo en estos tramos a comparación con los demás. Según la Figura No. 3, el número estructural del módulo de pavimento más bajo de 266.40 MPa (38,628 psi) y un espesor total de pavimento de 0.81 metros (31.9 pulgadas) debería ser mayor a 4.50, el cual cumple con el obtenido para este tramo. Sin embargo, éste está muy cercano al mínimo, por lo que se recomienda monitorear el tramo para detectar a tiempo una necesidad de refuerzo estructural en función de la rugosidad.

Figura No. 33. Irregularidades por peaje.



Fuente: Elaboración propia

Figura No. 34. Irregularidades por peaje.



Fuente: Elaboración propia

Cuadro No. 22. Módulo de resiliencia de la subrasante en tramos homogéneos del carril #8.

Módulo de resiliencia de la subrasante en carril #8					
Tramo		Promedio (MPa)	STD (MPa)	Percentil 85 (MPa)	Coef. Var.
Inicio	Final				
38.074	41.970	59.12	21.41	37.71	36.2%
41.970	43.918	80.89	19.76	61.14	24.4%
43.918	47.525	68.77	17.83	50.94	25.9%
47.525	52.023	65.88	30.10	35.79	45.7%
52.023	61.175	50.06	9.43	40.63	18.8%

Fuente: Elaboración propia

Cuadro No. 23. Módulo de pavimento en tramos homogéneos del carril #8.

Módulo de pavimento en carril #8					
Tramo		Promedio (MPa)	STD (MPa)	Percentil 85 (MPa)	Coef. Var.
Inicio	Final				
38.074	41.073	449.92	165.15	284.77	36.7%
41.073	44.671	663.35	215.71	447.65	32.5%
44.671	51.871	704.53	176.42	528.11	25.0%
51.871	61.175	548.81	129.71	419.10	23.6%

Fuente: Elaboración propia

Cuadro No. 24. Número estructural en tramos homogéneos del carril #8.

Número estructural en carril #8					
Tramo		Promedio	STD	Percentil 85	Coef. Var.
Inicio	Final				
38.074	43.168	5.86	0.84	5.02	14.2%
43.168	49.924	6.42	0.57	5.85	9.0%
49.924	61.175	5.86	0.44	5.41	7.6%

Fuente: Elaboración propia

En el carril #8 se tiene el mismo caso que el carril anterior, el coeficiente de variabilidad es elevado en el tramo que incluye las casetas del peaje (kilómetro 47+525 al 52+023) al igual que su módulo de resiliencia de la subrasante es el más bajo. Sin embargo, el módulo de pavimento en este tramo no es bajo, lo cual refleja que el resto de capas está funcionando lo suficientemente bien como para dar aporte al pavimento. Además, el número estructural en este tramo es alto. Esto demuestra que solamente la subrasante es débil, pero el conjunto del resto de capas siguen soportando las cargas con éxito. Para los

tres parámetros (módulo de subrasante, módulo de pavimento y número estructural) se obtuvieron valores bajos en el primer tramo (km 38+000 al 41+073), en donde se detectó que algunas partes de la base se encontraban con un alto contenido de humedad o con vacíos llenos de agua (ver Figura No. 31). Esta situación afecta de manera negativa al aporte de la base, pues su capacidad soporte se reduce considerablemente al tener un contenido de humedad mayor al óptimo. Además, si éstos significaran vacíos llenos de agua, en esos puntos la carpeta estaría soportando más carga que la de diseño, deteriorándose así más rápido. Cualquiera que sea la anomalía, tanto el georadar como el deflectómetro de impacto reflejan que es necesario ponerle especial atención a este tramo y considerar un sistema de subdrenajes adecuado para la protección de la estructura. Si analizamos el módulo de pavimento menor en este carril de 284.77 MPa (41,291.65 psi) se debería de tener un número estructural mayor a 4.50 para un espesor total de pavimento de 0.32 metros (32.28 pulgadas) (Figura No. 3). Según este criterio el número estructural sí cumple, ya que tiene un valor de 5.02.

Cuadro No. 25. Módulo de resiliencia de la subrasante en tramos homogéneos del carril #10.

Módulo de resiliencia en la subrasante en Carril #10					
Tramo		Promedio (MPa)	STD (MPa)	Percentil 85 (MPa)	Coef. Var.
Inicio	Final				
38.523	42.025	51.07	16.27	34.80	31.9%
42.025	43.822	73.95	29.37	44.58	39.7%
43.822	45.775	54.30	10.82	43.48	19.9%
45.775	50.424	75.60	24.59	51.01	32.5%
50.424	53.875	48.84	18.44	30.40	37.8%

Fuente: Elaboración propia

Cuadro No. 26. Módulo de pavimento en tramos homogéneos del carril #10.

Módulo de pavimento en carril 10					
Tramo		Promedio (MPa)	STD (MPa)	Percentil 85 (MPa)	Coef. Var.
Inicio	Final				
38.523	39.774	590.29	110.77	479.52	18.8%
39.774	40.825	341.52	176.59	164.93	51.7%
40.825	42.476	451.92	133.88	318.04	29.6%
42.476	45.924	457.62	178.48	279.14	39.0%
45.924	52.370	695.06	194.39	500.67	28.0%
52.370	53.875	509.71	54.85	454.86	10.8%

Fuente: Elaboración propia

Cuadro No. 27. Número estructural en tramos homogéneos del carril #10.

Número estructural en carril 10					
Tramo		Promedio	STD	Percentil 85	Coef. Var.
Inicio	Final				
38.523	40.377	5.74	0.78	4.95	13.7%
40.377	40.975	5.13	0.91	4.22	17.7%
40.975	42.625	5.58	0.58	5.00	10.4%
42.625	45.476	5.58	0.83	4.75	14.9%
45.476	48.924	6.23	0.70	5.54	11.1%
48.924	52.370	6.15	0.52	5.62	8.5%
52.370	53.875	5.74	0.20	5.54	3.5%

Fuente: Elaboración propia

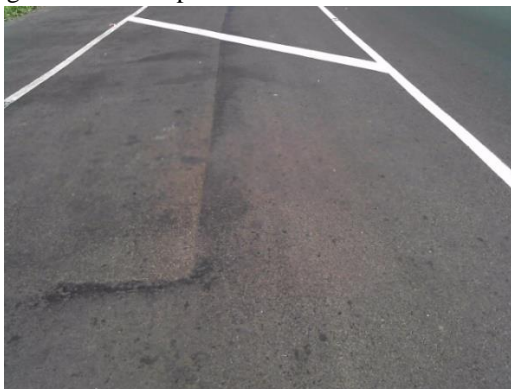
Por último, en el carril #10 se tiene un módulo de subrasante, un módulo de pavimento y un número estructural bajo para el tramo comprendido del kilómetro 40+377 al 40+975, así como coeficientes de variabilidad altos. Esto se debe a que en este tramo hay muchas irregularidades en la carpeta asfáltica, lo cual afecta mayormente al módulo de pavimento. Además, en este tramo se tiene un número estructural de 4.22, el cual según la Figura No. 3, debería de ser aproximadamente de 4.0 para un módulo de pavimento de 164.93 MPa (23,914.85 psi) y un espesor total de 0.86 metros (33.86 pulgadas). Esto quiere decir que aunque el tramo tenga valores bajos a comparación con el de los demás, su número estructural se encuentra por arriba del mínimo.

Figura No. 35. Reparaciones en el carril de ascenso.



Fuente: Elaboración propia

Figura No. 36. Reparaciones en el carril de ascenso.



Fuente: Elaboración propia

Al comparar los coeficientes de variabilidad de los parámetros analizados entre carriles, se observan que éstos son mayores para el carril #10, lo cual se debe a que en este carril se han hecho varias reparaciones, mejorando así solamente algunos tramos. En las Figuras No. 35 y 36 pueden verse algunas de las reparaciones realizadas en este carril.

En conclusión, se tienen algunos tramos críticos en todos los carriles que deben repararse, como los tramos en donde se encuentran los peajes y al inicio de los carriles (kilómetro 38). El resto de los tramos conserva módulos de subrasante-pavimento y número estructural adecuados para seguir en funcionamiento sin reparaciones por algunos años más. Se recomienda que en los tramos que se tenga un alto coeficiente de variabilidad y se quieran hacer reparaciones se diseñe con el valor crítico (promedio más desviación estándar).

3. Pavimento rígido

Para este tipo de pavimento se estudió una calle localizada en la zona 6 de la capital, que por su ubicación, pasan sobre ella una gran cantidad de vehículos y de camiones pesados. Aunque el diseño de este pavimento tenía una vida útil de 20 años, con tan sólo 3 años de vida se empezaron a notar grietas en algunas partes de las losas del pavimento (Figuras No. 37 y 38), por lo que se utilizó el georadar y el deflectómetro, todos ensayos no destructivos, para identificar cuál era el problema.

Figura No. 37. Fallas en pavimento rígido.



Fuente: Elaboración propia

Figura No. 38. Fallas en pavimento rígido.



Fuente: Elaboración propia

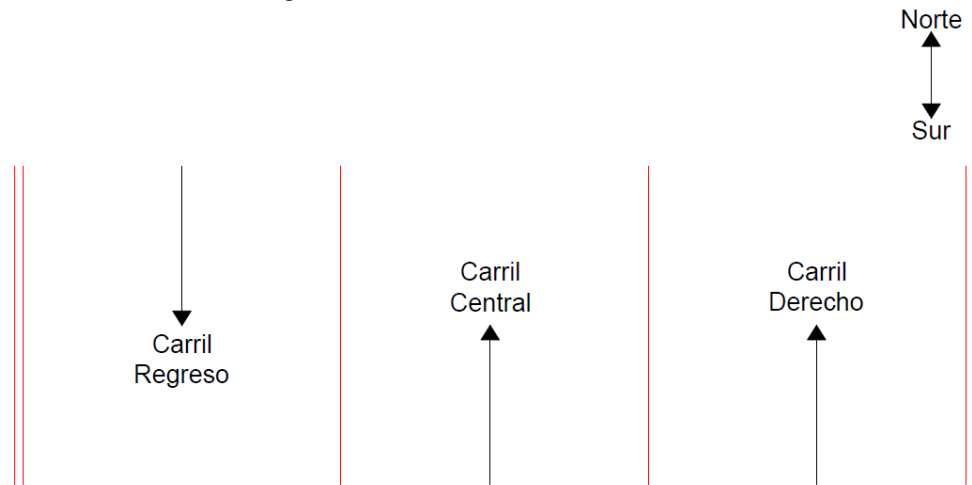
Figura No. 39. Ubicación de la calle en zona 6, Avenida La Pedrera..



Fuente: Google Earth

La calle tenía una longitud de 700 metros y las losas de la carpeta de concreto hidráulico que la conformaban medían 3.50 por 3.50 metros y debían tener un espesor de 16 centímetros. Además, en el diseño pedían una base de 15 centímetros, la cual estaba sobre una subrasante de arcilla, cuyos últimos 20 centímetros estaban estabilizados con cal. Esta calle contaba con tres carriles, dos vías yendo para el Norte y otra para el Sur. Para ver cómo se le denominará a cada carril a lo largo de este trabajo ver Figura No. 40.

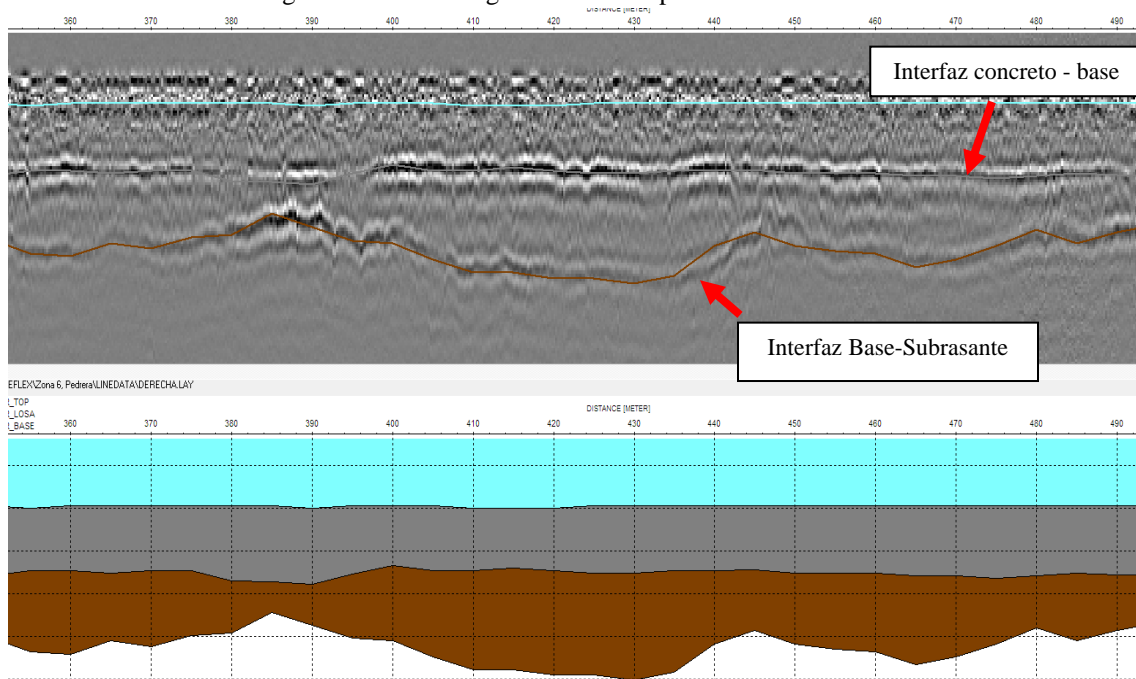
Figura No. 40. Nomenclatura de carriles.



Fuente: Elaboración propia

Para pavimentos rígidos es recomendable utilizar solamente la antena de menor frecuencia, pues las carpetas de concreto hidráulico suelen tener más espesor que las de asfalto y es necesario un radargrama de mayor profundidad para poder ver el cambio de constante dieléctrica. Por esta razón, solamente se analizaron los radargramas tomados con la antena de 800 MHz.

Figura No. 41. Radargrama obtenido para el carril derecho.



Fuente: Elaboración propia

En la Figura No. 41 puede notarse que la primera línea negra bien definida marca la interfaz del concreto con la base, lo cual indica el cambio de las constantes dieléctricas entre ambos materiales. La constante dieléctrica típica para el concreto es 8 y para la base 6 se obtiene una polaridad negativa (ver Cuadro No. 6 y Ecuación No. 1), que concuerda con lo observado en el radargrama. La polaridad negativa puede verse también en la interfaz de la base con la subrasante, ya que la constante dieléctrica para arcillas es de 3, la cual es menor que la especificada para la base (6), dando así un valor negativo para la ecuación de polaridad.

Para el layer show de ReflexW (Figura No. 41) se utilizó un intervalo para promediar los datos a cada 5.00 metros, siendo la capa gris la carpeta de rodadura y la café la base. Con estos valores se calculó el promedio y la desviación estándar para cada carril y se graficaron estos valores tanto para la losa de concreto hidráulico como para la base. Para ambos casos, la situación más crítica sería el promedio menos la desviación estándar, pues a menor espesor, menor será el aporte estructural de la capa.

En el Cuadro No. 28 puede verse que solamente el carril izquierdo cumple con un promedio de espesor de losa mayor a los 16 centímetros requeridos en el diseño, sin embargo, los otros dos carriles no están tan alejados de este valor. Para este caso es importante tomar la desviación estándar en cuenta para poder determinar cuánto varían los espesores en el tramo. Por lo tanto, si se tomaran en cuenta los valores críticos, ningún carril cumpliría con el espesor requerido, teniendo el derecho y el central aproximadamente 1.50 centímetros menos y el de regreso 0.70 centímetros menos. Estos centímetros

faltantes en el espesor de la losa toman gran importancia en los pavimentos rígidos, pues a diferencia de los flexibles, la losa de concreto hidráulico es la que mayormente soporta las cargas de tránsito.

Cuadro No. 28. Valores obtenidos para el espesor de la losa de concreto.

Carril	Espesor losa		
	Promedio	Desvest	Prom - desvest
Derecho	15.73	1.15	14.58
Central	15.74	1.20	14.54
Izquierdo	16.51	1.23	15.28

Fuente: Elaboración propia

Figura No. 42. Ejemplo gráfica para valores del espesor de la losa del carril central.

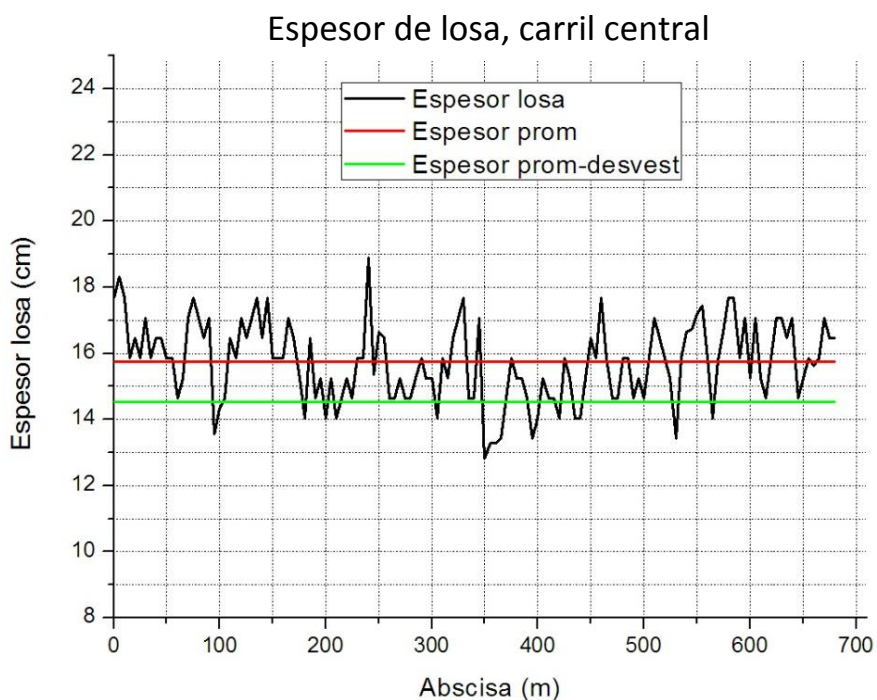
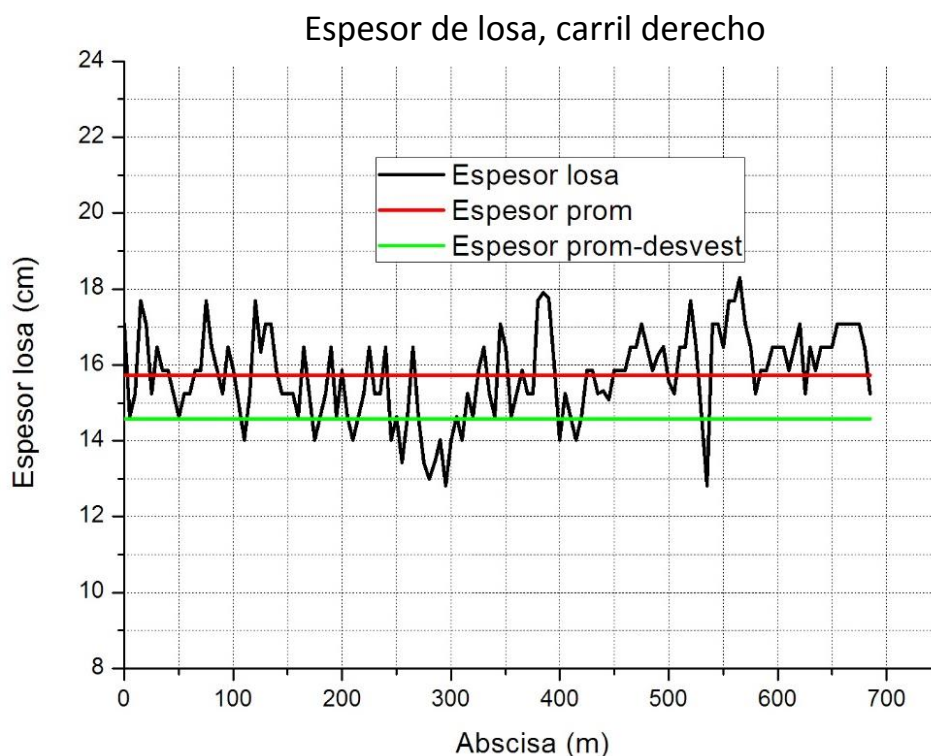


Figura No. 43. Ejemplo gráfica para valores del espesor de la losa del carril derecho.



Fuente: Elaboración propia

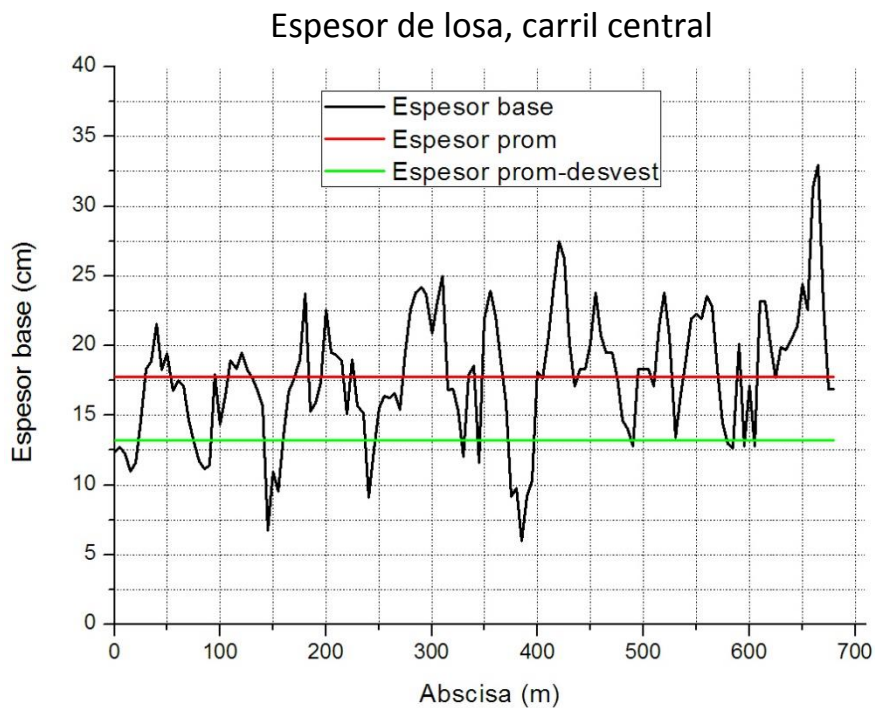
Concerniente a la base se tienen valores promedios por arriba del valor requerido para todos los carriles. Sin embargo, si se toman los valores críticos se tiene que solamente el carril de regreso cumple con un espesor de base mayor a los 15 centímetros. La desviación estándar para la base es mucho mayor que para la de la losa, pues con el tiempo esta puede mezclarse con los finos de la subrasante y perder sus propiedades granulares, disminuyendo así el espesor de la misma. Además, incluso en el proceso constructivo es difícil lograr que ésta quede totalmente uniforme a lo largo de todo el tramo.

Cuadro No. 29. Valores obtenidos para el espesor de la base.

Carril	Espesor base		
	Promedio	Desvest	Prom - desvest
Derecho	18.19	3.65	14.54
Central	17.78	4.59	13.19
Izquierdo	18.65	3.56	15.09

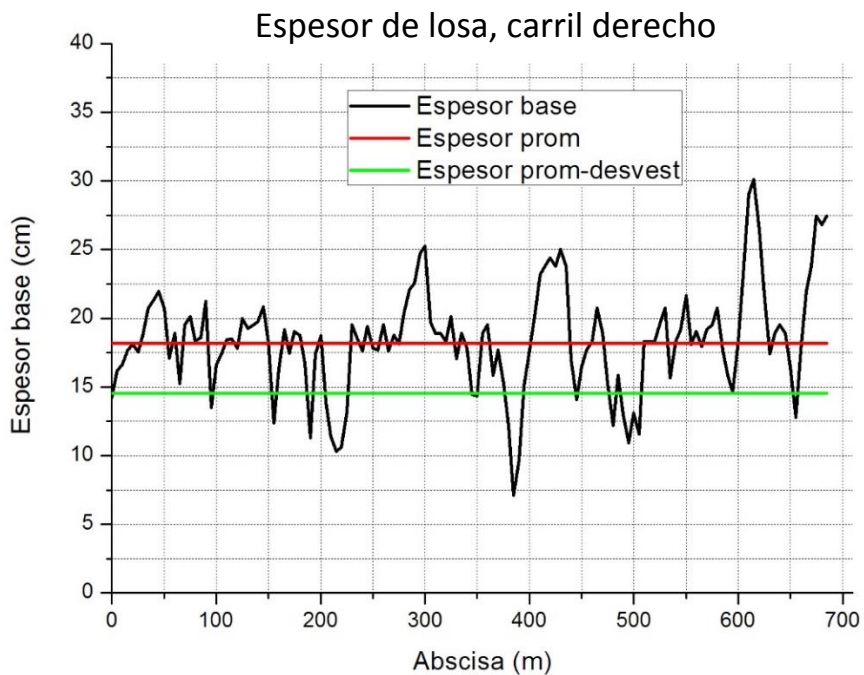
Fuente: Elaboración propia

Figura No. 44. Ejemplo gráfica para valores del espesor de la base para el carril central.



Fuente: Elaboración propia

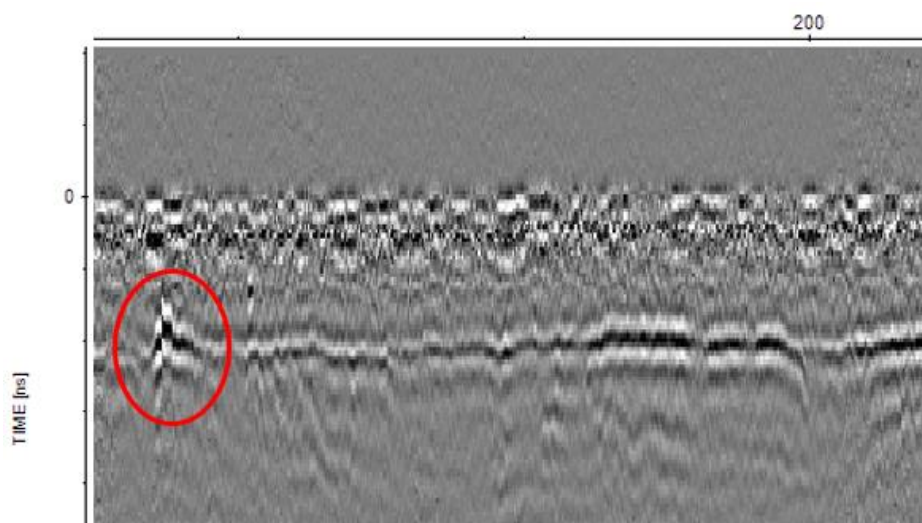
Figura No. 45. Ejemplo gráfica para valores del espesor de la base para el carril derecho.



Fuente: Elaboración propia

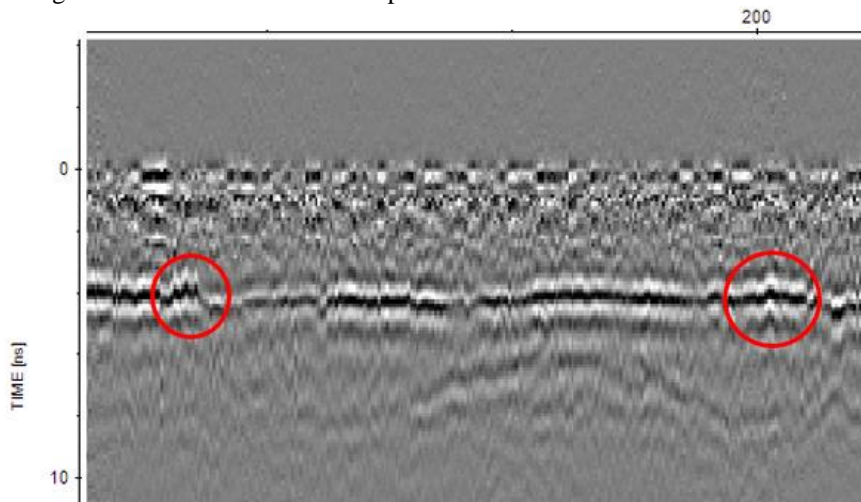
Se encontraron algunas anomalías bajo la losa de concreto hidráulico en los radargramas, las cuales pueden afectar la vida útil de la estructura de pavimento. Tanto en el carril derecho como en el central se detectaron algunas grietas en la base cercanas al metro 200, las cuales están representadas por hipérbolas angostas (Figura No. 46 y 47). Además, se localizó un vacío bajo la losa del carril derecho cercano al metro 400, ya que en el radargrama se obtuvo un cambio de polaridad para la interfaz. Este cambio se genera porque la constante dieléctrica del aire es menor que la de la base, convirtiéndose así en una polaridad positiva y cambiando su color a blanco. Es importante mencionar que este vacío es casi de 20 metros de longitud, por lo tanto afecta a más de cinco losas.

Figura No. 46. Grietas en la base para el carril central cercanas al metro 200.



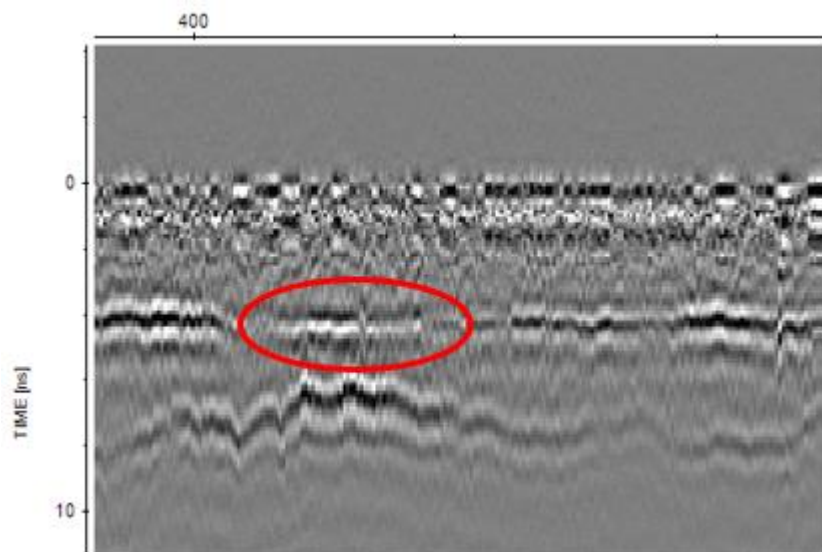
Fuente: Elaboración propia

Figura No. 47. Grietas en la base para el carril derecho cercanas al metro 200.



Fuente: Elaboración propia

Figura No. 48. Vacío bajo la losa para el carril derecho cercano al metro 400.



Fuente: Elaboración propia

Con el deflectómetro de impacto se realizaron tres tipos de medidas: una en el centro de la losa, otra en las esquinas y la última para determinar la transferencia de carga entre losas. Es importante mencionar que solamente se realizaron mediciones en el carril central y el derecho, pues estos eran los que estaban más deteriorados y necesitaban especial atención. Todas las deflexiones medidas fueron corregidas por carga utilizando la ecuación No. 9. Como puede notarse en la misma, si la carga teórica (en este caso de 9,000 libras) es mayor a la experimental se obtendrá un factor mayor a la unidad, por lo tanto, la deformación corregida deberá ser mayor a la obtenida por el deflectómetro y viceversa.

Ecuación No. 9. Corrección por carga para deflexiones.

$$Def_{corregida} = \frac{P_{teórica}}{P_{experimental}} * Def_{original}$$

Con la primera medida se determinaron las deflexiones que ocurrían en el centro de la losa con el fin de calcular el módulo de reacción de la subrasante (K) y el módulo de elasticidad de la carpeta de concreto. En el Cuadro No. 30 puede verse que los módulos de reacción K para ambos carriles son casi iguales y según el Cuadro No. 4, podría clasificarse el suelo como uno de grano fino, lo cual concuerda con la especificación dada para el proyecto, pues se contaba con una subrasante de arcilla. Es de suma importancia notar que, tanto para el módulo de reacción de la subrasante como para el módulo de

resiliencia del concreto, se analiza el valor crítico, el cual en este caso es el promedio menos la desviación estándar, pues mientras menores sean estos módulos, menor será la resistencia del pavimento y más afectado se verá al momento de que esté sometido a cargas.

Cuadro No. 30. Módulo de reacción K para la subrasante en ambos carriles.

Módulo de reacción K subrasante		
Carril	Prom-desvest	
	pci	Mpa/m
Central	81.57	22.14
Derecho	81.11	22.02

Fuente: Elaboración propia

Figura No. 49. Valores del módulo de elasticidad de la losa de concreto para el carril central.

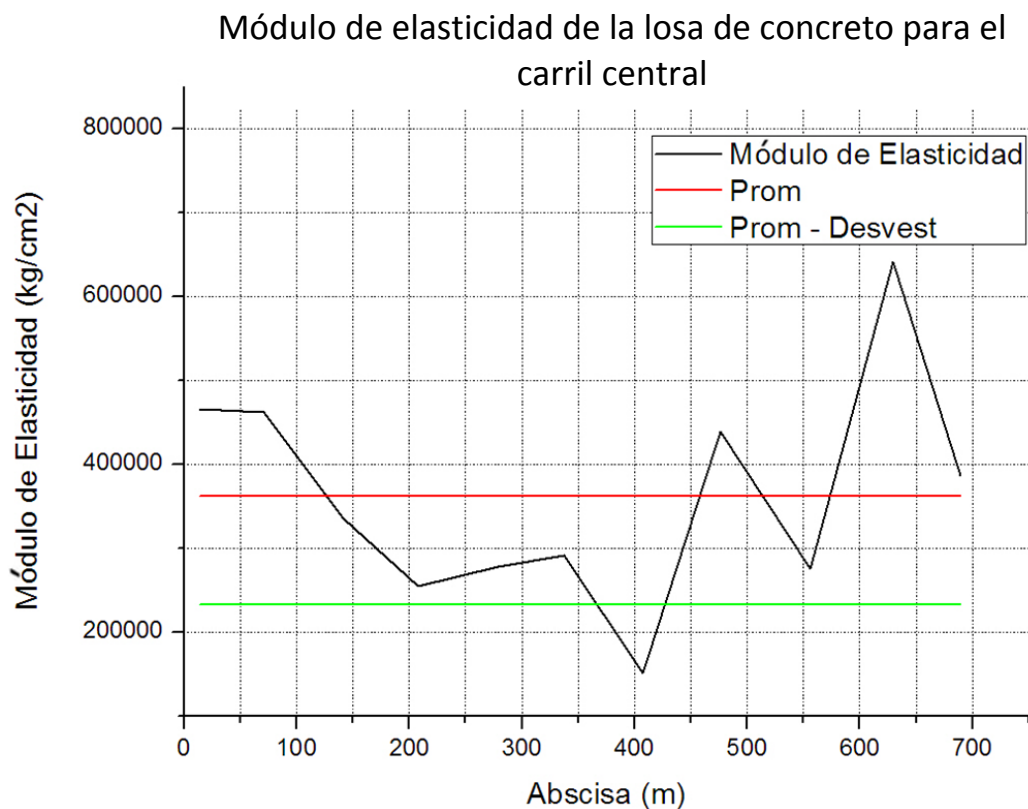
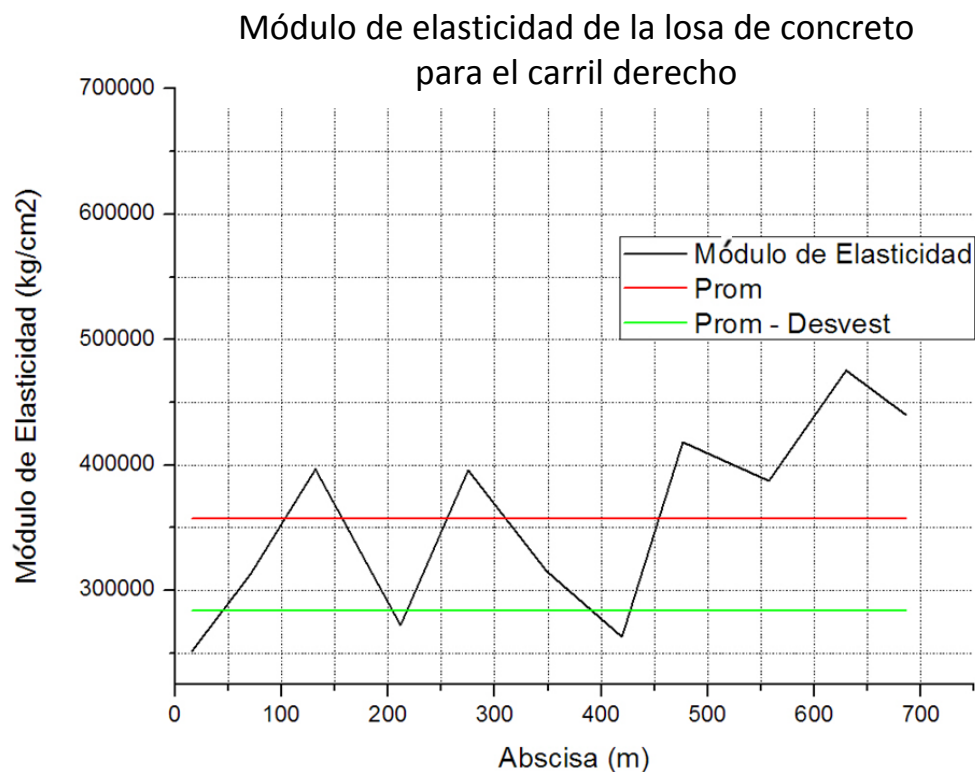


Figura No. 50. Valores del módulo de elasticidad de la losa de concreto para el carril derecho.



Fuente: Elaboración propia

Cuadro No. 31. Módulo de elasticidad de la losa de concreto para ambos carriles.

Módulo de elasticidad de la losa de concreto		
Carril	Prom-desvest	
	MPa	kg/cm ²
Central	22,909.41	233,607.27
Derecho	27,831.97	283,802.57

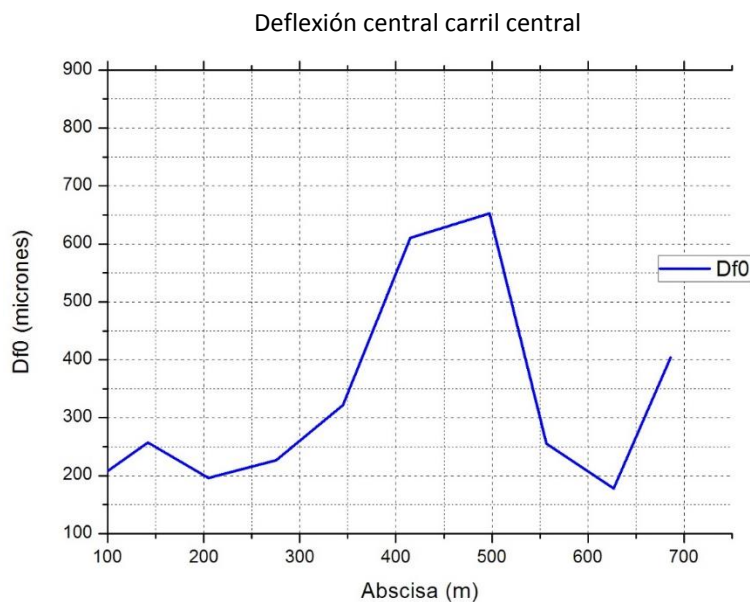
Fuente: Elaboración propia

Los valores críticos (promedio menos desviación estándar) mostrados en el Cuadro No. 31 pueden compararse con los valores típicos de módulos de elasticidad para el concreto hidráulico en pavimentos (ver Cuadro No. 3) y se concluye que éstos sí se encuentran dentro del rango esperado, pero son menores que el valor típico de 300,000 kg/cm². En las gráficas No. 46 y 47 puede observarse que para ambos carriles, los módulos de resiliencia más bajos se encuentran cercanos al metro 200 y al metro 400. Incluso en el carril derecho ambos de estos módulos no cumplen con el valor crítico establecido.

Al ver las gráficas de los espesores de losa para el carril central (Figura No. 42), se tiene que el espesor de la losa entre los metros 350 y 400 son mucho menores que el espesor crítico, concordando con los módulos de elasticidad más bajos, los cuales se ven afectados por el espesor de la losa. En el carril derecho se tienen espesores que sí cumplen con el valor crítico en estos tramos. Sin embargo, se localizaron pequeñas grietas en la base cercanas al metro 200, lo cual puede haber afectado el módulo de elasticidad de la carpeta de concreto, pues se tiene un soporte agrietado. Para el carril central, puede observarse también una disminución en el módulo de elasticidad de la carpeta en este tramo, lo cual se debe de igual manera a las grietas en la base. Asimismo, se detectó un vacío bajo la losa próxima al metro 400, lo cual explica el módulo de elasticidad de la carpeta tan bajo, ya que ésta no tiene soporte alguno y debe de resistir las cargas individualmente. Otro factor que también afectó estos módulos de elasticidad es que exactamente en estos dos puntos, el espesor de la base es mucho menor al valor crítico (promedio menos desviación estándar), teniendo así estas losas mucho menos soporte que las demás. Como puede verse, en los módulos de elasticidad de la carpeta influye principalmente la condición de la base, pues es el aporte inmediato que tiene la losa de concreto para distribuir y transferir las cargas vehiculares.

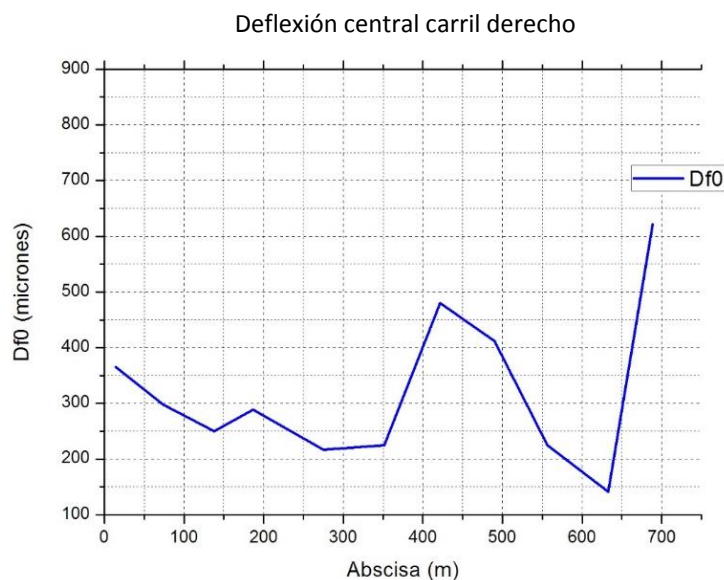
La medida en la esquina de la losa se realizó porque en los bordes de las losas es donde ocurren las deflexiones más grandes y por lo tanto esfuerzos elevados. El dato de interés para estas mediciones fue solamente la deflexión central. Para observar de mejor manera en qué tramos ocurren las deformaciones más elevadas y, por lo tanto, las más críticas, se realizaron las siguientes gráficas en donde se muestra la deflexión central según la estación.

Figura No. 51. Deflexiones máximas en las esquinas de las losas del carril central.



Fuente: Elaboración propia

Figura No. 52. Deflexiones máximas en las esquinas de las losas del carril derecho.



Fuente: Elaboración propia

Tanto para el carril central como para el derecho puede observarse que las deflexiones máximas en las esquinas ocurrieron entre aproximadamente 400 a 500 metros, lo cual indica un valor atípico a la deflexión promedio del tramo, representando un posible vacío bajo la losa.

La última medida realizada fue para determinar la transferencia de carga que existe entre las losas, cuya determinación es una relación entre la deflexión a 30 centímetros y la deflexión central, expresada en porcentaje. Mientras más parecidas sean las deflexiones, más cercana estará esta relación a la unidad, por lo tanto, mejor será la transferencia de carga, pues se deduce que una sola losa no está absorbiendo toda la carga, sino que la transfiere a la losa adyacente, deformándose así ambas losas. Es importante mencionar que ambas deflexiones deben de ser corregidas por carga con la ecuación No. 9.

Cuadro No. 32. Transferencia de cargas para el carril central.

Carril central		
Estación	Eficiencia de transferencia (%)	Conclusión
17.10	90.75	BUENO
66.70	83.87	BUENO
172.60	78.60	BUENO
218.50	85.00	BUENO
274.50	77.74	BUENO
348.00	88.86	BUENO
418.10	91.15	BUENO
486.50	52.63	DEFICIENTE
556.30	86.49	BUENO
629.70	91.42	BUENO
686.00	95.08	BUENO

Fuente: Elaboración propia

Cuadro No. 33. Transferencia de cargas para el carril derecho.

Carril derecho		
Estación	Eficiencia de transferencia (%)	Conclusión
16.40	80.21	BUENO
68.90	92.34	BUENO
136.10	87.84	BUENO
218.70	93.33	BUENO
273.40	92.03	BUENO
346.60	94.38	BUENO
416.70	88.47	BUENO
490.50	89.57	BUENO
555.30	88.91	BUENO
631.10	89.48	BUENO
690.30	93.41	BUENO

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en los cuadros adyacentes, ambos carriles tienen una transferencia de carga buena, ya que los valores son mayores a 70%. Únicamente, en la estación 486 metros del carril central se tiene una eficiencia de transferencia de 50%, lo cual puede deberse al escalonamiento entre losas, siendo ésta provocada por la falta de pasadores o por una abertura de junta demasiado grande, lo cual no permite que ambas losas estén conectadas y que solamente una reciba toda la carga. Sin embargo, se concluye que la transferencia de carga en general es aceptable.

En conclusión, las grietas que se muestran en las losas de concreto se pueden deber a un deficiente diseño o control de calidad de materiales, pues se localizaron tramos con grietas en la base y con espesores de carpeta y base menores a los de diseño. Además, se tienen un vacío en el carril derecho que tiene casi 20 metros de longitud, lo cual es perjudicial para las losas que se encuentran sobre él. Los módulos de elasticidad de la carpeta en general son menores al valor típico, lo cual se debe principalmente a los materiales y sus dosificaciones utilizadas para la mezcla de concreto.

XII. CONCLUSIONES

- Se concluye que la técnica del georadar puede aplicarse exitosamente para el análisis de espesores y anomalías en las capas de estructuras de pavimento y subrasante como complemento a las técnicas convencionales, con el fin de reducir costos, tiempo de recaudación de información y interrupción pública. Además, esta tecnología ofrece una visión longitudinal global de la estructura de pavimento, lo cual brinda datos más representativos para encontrar las secciones débiles u otro agente que pueda dañar la vida útil de la misma.
- Se investigó que el funcionamiento de la técnica geofísica del georadar depende en gran medida de las propiedades electromagnéticas de los materiales de estudio. Mientras más contraste haya en la constante dieléctrica entre dos medios, mayor será la energía reflejada, siendo así las características del radargrama más evidentes. Asimismo, esta propiedad influye en la polaridad de la señal. Otros elementos a considerar en los estudios con georadar son los objetivos que se planteen y las características físicas del terreno, ya que éstos regirán el equipo a utilizar, el nivel de interpretación y el presupuesto necesario para alcanzar los resultados deseados. De la revisión bibliográfica se encontró que el georadar también es aplicable a la inspección y evaluación de edificios, al estudio del suelo y de las cimentaciones, al análisis de puentes de concreto y mampostería y a la detección de obstáculos en el subsuelo.
- Se estudiaron técnicas de intervención para rehabilitaciones de estructuras de pavimento como: sobrecarpetas asfálticas, inyecciones de lechada y arreglos menores. Según las evaluaciones realizadas con el georadar y el deflectómetro de impacto se identificaron las secciones débiles que requerían algún tipo de intervención de mantenimiento o de refuerzo estructural.
- Se calibraron metodologías de medición para la exitosa obtención de perfiles, determinando que para la visualización de carpetas con un espesor menor a 15 centímetros, la antena de alta frecuencia, en este caso de 2.3 GHz, muestra mejores resultados; mientras que para carpetas mayores se recomienda la utilización de antenas de baja frecuencia. Además, se validó la precisión de las mediciones obtenidas con el georadar, calibrando las velocidades de propagación de onda y determinando las fases que representan las capas de pavimento en los radargramas mediante la realización de calicatas o extracciones de núcleos en puntos específicos.

- Se procesaron los datos crudos de proyectos reales en el programa ReflexW, en donde se comprobó que las fases de las capas de la estructura de pavimento se visualizan de mejor forma en los radargramas aplicando un proceso de filtros de ganancia/contraste, de banda, suavizantes y de reducción. En este mismo programa se generaron secciones del pavimento en estudio, en donde se ven las distintas capas con sus respectivos espesores.
- Se complementaron los resultados obtenidos por el georadar con el ensayo no destructivo del deflectómetro de impacto para conocer la capacidad estructural del pavimento. La técnica no destructiva del georadar permite la medición de los espesores de la estructura de pavimento a una frecuencia mínima de 0.025 metros, proporcionando información importante para el aumento de la confiabilidad en el cálculo de los módulos de elasticidad de las capas de pavimento.
- Se promueve la utilización de la técnica del georadar para la evaluación de proyectos viales, ya que es posible detectar zonas de debilidad y anomalías en las secciones longitudinales y transversales de la estructura de pavimento. Esto para gestionar las intervenciones de mantenimiento o reparación a corto, mediano y largo plazo. Asimismo, el georadar permite su aplicación en la detección de objetos como tuberías, cables, vacíos por debajo de la estructura, formación de grietas y migración de finos.

XIII. RECOMENDACIONES

- En estudios con el georadar en donde se quiera medir grandes distancias a velocidades altas, se recomienda utilizar el carretón adaptable al carro; mientras que si son secciones específicas o transversales es mejor utilizar el carrito todo terreno, el cual es empujado por el usuario. Si se quisiera tomar alguna medición exactamente arriba de una extracción de núcleo o calicata se exhorta a usar el mini carro, pues permite mediciones pequeñas a bajas velocidades y con alta resolución. Las mediciones con el carretón adaptable al carro muestran una mejor resolución cuando se selecciona la opción que ésta cambie automáticamente conforme la velocidad del carro.
- Para obtener radargramas de buena calidad son importantes las siguientes consideraciones: las mediciones del georadar deben hacerse en condiciones secas, ya que la humedad de la superficie puede alterar la velocidad de la onda de propagación y dificultar la interpretación del radargrama; la resolución elegida para la medición de datos influirá en la velocidad máxima de transporte, pues al superar esta velocidad no se definirán las fases claramente por errores de recepción de antena; e ir visualizando el radargrama en campo para asegurarse que el equipo esté funcionando correctamente y que las configuraciones elegidas son las adecuadas. Además, es sumamente recomendable hacer uso de la odometría y la georeferenciación para la ubicación de puntos específicos del radargrama en campo.
- En caso de carecer de información sobre las propiedades eléctricas de los materiales y/o de espesores de capas del pavimento se recomienda asumir una velocidad de 0.10 m/ns para un concreto asfáltico convencional y de 0.137 m/ns para las bases granulares o trituradas. Si existe una base estabilizada u otro tipo de base no convencional no se recomienda asumir la velocidad sin la extracción de núcleos.
- El georadar puede complementarse de manera exitosa con otros ensayos no destructivos como el deflectómetro de impacto y el perfilómetro inercial, logrando así una evaluación completa de la estructura de pavimento. Se recomienda hacer mediciones de deflexión máxima con el deflectómetro, clasificarlas en tramos homogéneos y extraer un núcleo en cada tramo homogéneo, esto para la calibración de las fases de la estructura de pavimento. El perfilómetro inercial puede utilizarse para analizar la experiencia del usuario sobre el pavimento.

- Aunque determinar el módulo de resiliencia de las capas pertenecientes a un pavimento es costoso y se requiere mayor tiempo que un ensayo CBR, este es la mejor manera de conocer las propiedades de un suelo ante una carga dinámica. Así que, se recomienda identificar este valor para aumentar la confiabilidad de diseño y eliminar el carácter empírico de las correlaciones.
- Se exhorta a estudiar más detalladamente la aplicación del georadar en otros ámbitos de la ingeniería civil, como: la inspección y evaluación de edificios, el estudio del suelo y de las cimentaciones, el análisis de puentes de concreto y mampostería y la detección de obstáculos en el subsuelo; ya que Guatemala carece de planos de estructuras antiguas y de mapeos de los servicios.

XIV. BIBLIOGRAFÍA

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, Estados Unidos: AASHTO.
- Ahmed, M.; R. Tarefder y A. Maji. 2014. *Variation of FWD Modulus Due to Incorporation of GPR Predicted Layer Thicknesses*. *Revista de la Universidad de Nuevo México*. 6 pp.
- Ahlvin, R. & Allen, V. (1988). *Construction Guide for Soils and Foundation*. Estados Unidos, Nueva York: John Wiley & Sons.
- American Society for Testing Materials. 2011. *Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation*. Estados Unidos. ASTM. 18 págs.
- American Society for Testing Materials. (2011). *Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils*. Estados Unidos. ASTM D1586. 9 pp.
- Benedetto, Andrea y L. Pajewski. 2015. *Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar*. Suiza: Springer International Publishing. 373 pp.
- Benedetto, Andrea, *et al.* 2016. *An overview of ground-penetrating radar signal processing techniques for road inspections*. *Revista de Science Direct, Signal Processing*, 201-209.
- Boardman, D., Glendinning, S., & Rogers, C. (2001). *Development of stabilisation and solidification in lime-clay mixes*. *Geotechnique*, 51(6), 533-543.
- Bonilla, G. (2004). *Guía NCHRP 1-37ª: Rompiendo Paradigmas en el Diseño de Pavimentos*. Tekhne, VII, p.28.
- Botía, W. (2015). *Manual de Procedimientos de Ensayos de Suelos y Memoria de Cálculo*. (Tesis de Licenciatura). Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.
- Crespo, R. & Ruiz, J. (2001). *Evaluación Estructural de Firmes de Carreteras*. Marzo 7, 2017, de AEPO ingenieros consultores Sitio web: <http://www.camineros.com/docs/cam010.pdf>
- Crespo, C. (2004). *Mecánica de Suelos y Cimentaciones*. Limusa, México: Grupo Noriega.

- Colegio de Ingenieros de Guatemala. (2001). *Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes*. Guatemala: Dirección General de Caminos, Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y vivienda.
- Daniels, J. (2000). *Ground Penetrating Radar Fundamentals*. U.S.EPA, Region V, 21 págs.
- Del Águila, P. (2008). *Método directo para la evaluación de las necesidades estructurales de pavimentos flexibles basado en deflexiones con el deflectómetro de impacto (FWD)*. Marzo 15, 2017, de Camineros, Perú Sitio web: <http://www.camineros.com/docs/cam061.pdf>
- Espinosa, J., & Alarcón, J. (2012). *Pavimentos rígidos vs flexibles: ¿Cuál es mejor?*. México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Farny, J. (2001). *Pisos industriales de concreto*. Diciembre 8, 2016, de Construcción y Tecnología en Concreto Sitio web: <http://www.imcyc.com/revistacyt/may10/ingenieria.htm>
- Faúndez, R. (2011). *Estimación del coeficiente estructural del asfalto espumado mediante el análisis de deflectometría FWD*. (Tesis Licenciatura). Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Garnica, P., Pérez, N., Gómez, J. (2001). *Módulos de resiliencia en suelos finos y materiales granulares*. Marzo 8, 2017, de Secretaría de Comunicaciones y Transportes del Instituto Mexicano del Transporte Sitio web: <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt142.pdf>
- Gehrig, M., Morris, D., & Bryant, J. (2004). *Ground Penetrating Radar for Concrete Evaluation Studies*. Texas, Estados Unidos: Bryant Consultants.
- Griffin, S., & Pippet, T. (s/f). *Ground Penetrating Radar*. Australia: Geophysical Technology Limited.
- González, M. (2001). *El Terreno*. Barcelona, España: Edicions Virtuals.
- Gutiérrez, F. (2004). *Diseño de Pavimento*. Rediseño geométrico del distribuidor vial de la UDLA P en la ruta Quetzalcóatl. (Tesis Licenciatura). Universidad de las Américas de Puebla, Puebla, México.
- Higuera, C. (2010). *Caracterización de la resistencia de la subrasante con la información del deflectómetro de impacto*. Revista Facultad de Ingeniería, UPTC, Vol. 19, pp. 73-92.
- Jol, H. (2009). *Ground Penetration Radar: Theory and Applications*. Reino Unido, Londres: Elsevier.

- Leal, M. (2010). *Relación entre el Módulo Resiliente hallado por retrocálculo y el encontrado en ensayos de laboratorio*. (Tesis Magistral). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Li, M., Anderson, N., Sneed, L., & Torgashov, E. (2016). *Condition assessment of concrete pavements using both ground penetrating radar and stress-wave based techniques*. Science Direct, Journal of Applied Geophysics, 297-308 pp.
- Li, S., Wang, C., Sun, P., Wu, G. & Wang, D. (2016). *A localization method for concealed cracks in the road base based on ground penetrating radar*. Advanced in Mechanical Engineering, Vol. 8, 10 pp.
- Loken, M. (2007). *Use of Ground Penetrating Radar to Evaluate Minnesota Roads*. (45). Minnesota, EEUU: Minnesota Department of Transportation.
- Loria, L., et al. (2014). *Evaluación de métodos de diseño de sobrecapas asfálticas contra reflejo de grietas*. Universidad de Costa Rica, LANAMME, 9 pp.
- MALA. (2011). *MALA High Frequency Antennas*. Suiza: MALA Geoscience.
- MALA. (2011). *MALA High Shielded Antennas*. Suiza: MALA Geoscience.
- Marecos, V., Solla, M., Fontul, S., & Antunes, V. (2017). *Assesing the pavement subgrade by combining different non-destructive methods*. Construction and Building Materials, 76-85 pp.
- Meza, P. (2012). *Calicata: Perfil del suelo*. Septiembre 11, 2017, de Engormix Agricultura Sitio web: <https://www.engormix.com/agricultura/articulos/perfil-de-suelo-t29352.htm>
- Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones. (2011). *Manual de Carreteras del Paraguay, Normas para Materiales y Ensayo de Materiales*. Paraguay: Tomo 6-Volumen II.
- Moreno, J. (2005). *Cápítulo 4: El módulo resiliente*. Marzo 7, 2017, de Universidad Politécnica de Catalunya Sitio web: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3252/50777-10.pdf?sequence=10>
- Reeves, G., Sims, I., & Cripps, J. (2006). *Clay Materials Used in Construction*. Londres, Inglaterra: The Geological Society.
- Sánchez, F. (2016). *Materiales para base y subbase*. Junio 14, 2017, de SlideShare Sitio web: <https://www.slideshare.net/castilloaroni/mdulo-7-materiales-para-base-y-subbase-fernando-sanchez-sabogal>

Sandmeier, K. (2015). *About ReflexW*. En ReflexW(p. 12). Alemania: Sandmeier Geophysical Research.

Uddin, W. (2014). *An Overview of GPR Applications for Evaluations of Pavement Thickness and Cracking*. Center for Advanced Infrastructure Technology, 6 págs.

XV. GLOSARIO

Amplitud de onda: distancia entre el punto más alejado de una onda y el punto de equilibrio medio.

Antena: dispositivo perteneciente al georadar que genera y colecta las ondas electromagnéticas de corto pulso.

Arcillas rápidas: suelo extremadamente sensible a la licuefacción cuando es sometido a pequeños disturbios. Está compuesto principalmente por partículas menores a 0.002 micrómetros con grandes proporciones de cuarzo, altas porosidades y contenidos de humedad.

Coefficiente de variación: relación entre el tamaño de la media y la variabilidad de la variable estudiada. Es expresada como porcentaje y presenta una mejor interpretación del grado de variabilidad que la desviación estándar. A mayor coeficiente de variación, mayor heterogeneidad de los valores.

Cuenco de deflexiones: gráfico resultante de la representación de las distancias de los sensores al centro de la placa de carga sobre el eje de abscisas y las deflexiones obtenidas correspondientes a cada uno de los sensores en el eje de ordenadas.

Deflexión central: deflexión producida directamente bajo el punto de carga del deflectómetro de impacto, siendo la máxima observada en el cuenco de deflexiones.

Desviación estándar: medida de centralización o dispersión para variables de razón y de intervalo, que son de gran utilidad en la estadística descriptiva.

Ensayos convencionales: estudios que requieren romper el pavimento para obtener muestras y así analizar sus características en laboratorio.

Fuerzas de atracción: capacidad que tienen las partículas de suelo de permanecer unidas como conjunto debido a las microestructuras existentes.

Interface: en este caso se refiere a los puntos en donde se produce un cambio de material de las distintas capas que componen un pavimento.

Longitud de onda: distancia que recorre la onda en un determinado intervalo de tiempo.

Micrón: también llamado micrómetro es la unidad de longitud que equivale a una millonésima parte de un metro. Las deflexiones obtenidas del deflectómetro de impacto están dadas en esta unidad y su símbolo científico es μm .

Odómetro: aparato que cuenta automáticamente la distancia recorrida por el georadar. Éste se encuentra en la llanta del transporte del mismo.

Procesador de señal: programa de computadora especial para la interpretación de datos obtenidos con el georadar.

Puerto de alta y baja frecuencia: terminal del georadar en donde se conectan las antenas a utilizar. En el módulo de baja frecuencia se conectan las antenas de 250, 500 u 800 MHz; mientras que en el de alta frecuencia la antena de 2.3 GHz.

Sistemas de impulsos: emite pequeños pulsos pero de gran intensidad de manera constante.

Sistemas de frecuencias escalonadas: transmite pulsos que van incrementando la frecuencia linealmente en pasos discretos.

Suelos dispersivos: tipo de arcillas que por su naturaleza mineralógica son susceptibles a la erosión con la presencia de agua.

Visualización de la imagen escaneada: observar en campo los radargramas del estudio por medio de un monitor para confirmar que todo el equipo esté funcionando correctamente.