



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería de Estudios de Postgrado
Maestría en Ingeniería Vial

**COMPARACIÓN ENTRE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS Y DESTRUCTIVOS, PARA LA
EVALUACIÓN Y DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES**

Ing. Pablo Missael Cox Tuch

Asesorado por Msc. Ing. Mario Rodrigo Rubio Haasler

Guatemala, enero de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPARACIÓN ENTRE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS Y DESTRUCTIVOS, PARA LA
EVALUACIÓN Y DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. PABLO MISSAEL COX TUCH
ASESORADO POR MSc. ING. MARIO RODRIGO RUBIO HAASLER

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA VIAL

GUATEMALA, ENERO DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIA	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Carlos Arnoldo Morales Rosales
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Jorge Alejandro Juárez Ortega
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

COMPARACIÓN ENTRE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS Y DESTRUCTIVOS, PARA LA EVALUACIÓN Y DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, con fecha 03 de febrero de 2021.



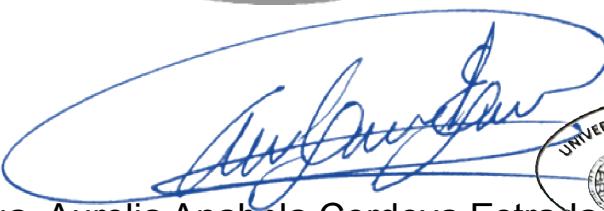
Ing. Pablo Missael Cox Tuch

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.133.2023

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **COMPARACIÓN ENTRE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS Y DESTRUCTIVOS, PARA LA EVALUACIÓN Y DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES**, presentado por: **Ing. Pablo Missael Cox Tuch**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Ingeniería vial después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
★

Decana

Guatemala, enero de 2023

AACE/gaoc



Guatemala, enero de 2023

LNG.EEP.OI.133.2023

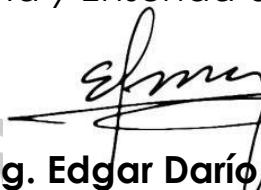
En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

**“COMPARACIÓN ENTRE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS Y
DESTRUCTIVOS, PARA LA EVALUACIÓN Y DISEÑO DE ESTRUCTURAS
DE PAVIMENTOS FLEXIBLES”**

presentado por **Ing. Pablo Missael Cox Tuch**
correspondiente al programa de **Maestría en artes en Ingeniería
vial**; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”


Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





ESCUELA DE ESTUDIOS DE
POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA

Guatemala, 22 de agosto de 2022

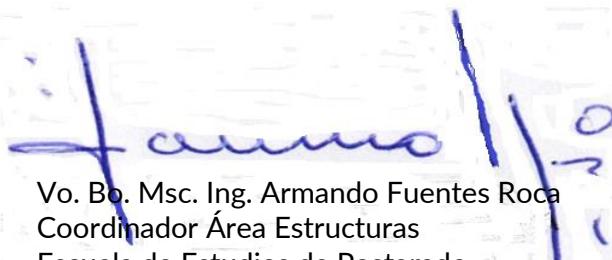
MSc. Ing Edgar Álvarez Cotí
Director, Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Por este medio informo a usted, que se ha revisado y APROBADO la siguiente TESIS DE GRADUACIÓN del alumno:

Carné: 200930360
Alumno: Pablo Missael Cox Tuch
Maestría: Maestría en Artes en Ingeniería Vial
Título de la
Investigación: "COMPARACIÓN ENTRE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS. Y
DESTRUCTIVOS, PARA LA EVALUACIÓN Y DISEÑO DE
ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES"

En este sentido, extiendo el Visto Bueno correspondiente, para el cumplimiento de requisitos de la Escuela de Estudios de Postgrado, de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Sin otro particular



Vo. Bo. Msc. Ing. Armando Fuentes Roca
Coordinador Área Estructuras
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería

Guatemala, julio de 2022

Maestro
Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
USAC – Facultad de Ingeniería

Estimado Maestro Álvarez

En mi calidad como Asesor del Ingeniero Civil **Pablo Missael Cox Tuch** quien se identifica con carné No. **200930360** procedo a dar la aprobación correspondiente al Trabajo de Graduación titulado: “**COMPARACIÓN ENTRE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS Y DESTRUCTIVOS, PARA LA EVALUACIÓN Y DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES**” quien se encuentra en el programa de Maestría en Artes en Ingeniería Vial en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,



Msc. Ing. Mario Rodrigo Rubio Haasler

Asesor

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Quien merece toda honra y gloria.
Mi madre	Clara Tuch, por ser mi guía y pilar en todo momento, un abrazo al cielo (q.e.p.d.).
Mis hermanos	Con mucho cariño y aprecio a María Angélica Tuch y Luis Miguel Batz Tuch (q.e.p.d.).
Mi prometida	Ana María Rocché Peneleu, por su cariño, compañía y ánimo a seguir adelante siempre, con mucho amor.
Mi sobrino	Juan José González Tuch, como muestra de aprecio y perseverancia.
Mis primos	Con mucho cariño y aprecio.
Amigos y compañeros	Por las experiencias y momentos compartidos, con mucho aprecio.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por darme la vida y la sabiduría.
Mi Familia	Por ser un pilar en mi vida y por todo el apoyo que me han brindado.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi alma <i>mater</i> .
Escuela de Postgrado de la Facultad de Ingeniería	Por la valiosa aportación académica y los conocimientos adquiridos.
Ingeniero Rodrigo Rubio	Por su valiosa colaboración en la asesoría del presente trabajo.
Instituto del Asfalto de Guatemala	Por todo el apoyo recibido en la elaboración del presente trabajo, en especial a la Arq. Eunice Bonilla, por la gestión realizada.
Pavimentos de Guatemala, S.A.	Por todo el apoyo y aporte a mi crecimiento profesional, en especial al Ing. Pedro Rocco y al Lic. Allen Krebs.
SERPIN	Por su valioso aporte en el presente trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XV
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS	
ORIENTADORAS	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
ANTECEDENTES.....	XXIII
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Diseño y evaluación de pavimentos flexibles	1
1.1.1. Definición de pavimento	1
1.1.2. Pavimentos flexibles	2
1.1.3. Estructura del pavimento flexible	2
1.1.3.1. Carpeta asfáltica.....	2
1.1.3.2. Base	3
1.1.3.3. Subbase	3
1.1.4. Evaluación de pavimentos flexibles	3
1.1.5. Diseño estructural de pavimentos flexibles.....	4
1.1.5.1. Método de diseño AASHTO 93.....	4
1.2. Evaluación de pavimentos flexibles mediante ensayos destructivos	5
1.2.1. Calicatas.....	5
1.2.2. Núcleos de mezcla asfáltica	6

1.2.3.	Estabilidad Marshall	6
1.2.4.	Ensayo de CBR.....	6
1.3.	Evaluación de pavimentos flexibles mediante ensayos no destructivos.	7
1.3.1.	Ensayos de deflectometría por medio del LWD	7
1.3.2.	Ensayos de determinación de espesores por Georadar	8
1.3.3.	Ensayos de determinación de compactación por medio de densímetros no nucleares	8
2.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	11
2.1.	Generalidades de los ensayos propuestos	11
2.2.	Evaluación de módulos de resiliencia de la subrasante	11
2.3.	Evaluación de compactación de pavimentos asfálticos.....	13
2.4.	Evaluación y medición de estratos de la estructura del pavimento asfáltico.....	15
3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	19
3.1.	Comparación de resultados del módulo de resiliencia de la subrasante	19
3.2.	Comparación de ensayos de compactación de la carpeta asfáltica por el método destructivo	35
3.3.	Comparación de ensayos de compactación de la carpeta asfáltica por el método no destructivo	37
3.4.	Mediciones de estratos que componen la estructura del pavimento flexible por el método destructivo	40
3.5.	Mediciones de estratos que componen la estructura del pavimento flexible por el método no destructivo	42

4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	47
4.1.	Comparación de resultados de ensayos con métodos destructivos y métodos no destructivos	47
4.1.1.	Módulo de resiliencia de la subsanante.....	47
4.1.2.	Grado de compactación de carpeta asfáltica.....	50
4.1.3.	Medición de estratos de la estructura del pavimento	53
4.1.3.1.	Estrato de carpeta asfáltica	53
4.1.3.2.	Estrato de base.....	55
4.1.3.3.	Estrato de sub base.....	56
4.1.3.4.	Costo y eficiencia de cada método	58
	CONCLUSIONES	63
	RECOMENDACIONES.....	65
	REFERENCIAS	67

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ecuación AASHTO 93 para pavimentos flexibles	4
2.	Ensayo de deflectometría con peso ligero	12
3.	Ensayo de compactación de pavimento asfáltico.....	14
4.	Evaluación de espesores con georadar	16
5.	Recopilación de datos con el monitor del georadar	17
6.	Procesamiento de datos del georadar.....	17
7.	Gráfica de la curva granulométrica de la subrasante	21
8.	Datos de resultados obtenidos de deflectometría LWD	25
9.	MR de retrocálculo vs MR (CBR)	28
10.	Valores promedio de MR de retrocálculo por tramos homogéneos	30
11.	Resultados de compactación de núcleos extraídos	36
12.	Gráfica de compactación de núcleos asfálticos	37
13.	Porcentaje de compactación con densímetro electrónico	38
14.	Gráfica de compactación con densímetro electrónico.....	40
15.	Resultados de mediciones de estratos de calicatas 1, 2 y 3	41
16.	Resultados de mediciones de estratos de calicatas 4, 5 y 6	42
17.	Resultado de mediciones por medio del georadar	43
18.	MR de diseño y MR (CBR).....	49
19.	Gráfica de comparación de compactaciones	52
20.	Promedio de compactaciones	52
21.	Espesores de carpeta asfáltica	54
22.	Espesores de base.....	56
23.	Espesores de sub base.....	57

24.	Costo de los ensayos propuestos	60
25.	Duración de ejecución de los ensayos propuestos	61

TABLAS

I.	Análisis granulométrico de la subrasante	20
II.	Resultados de la clasificación del suelo y valor del CBR	21
III.	Factor C y módulo de Poisson del módulo de la subrasante	22
IV.	Tramos homogéneos de MR de retrocálculo	29
V.	Ajuste del MR de retrocálculo por su desviación estándar y su coeficiente de varianza	31
VI.	MR de diseño y MR (CBR)	31
VII.	Número estructural con MR (CBR)	32
VIII.	Número estructural con MR de diseño primer sub tramo.....	33
IX.	Número estructural con MR de diseño segundo sub tramo	33
X.	Número estructural con MR de diseño tercer sub tramo.....	34
XI.	RESUMEN DE RESULTADOS DE NÚMERO ESTRUCTURAL.....	34
XII.	Resultados de mediciones de estratos con georadar	44
XIII.	Diferencias de módulos de resiliencia MR calculado por ambos métodos	48
XIV.	Diferencias de Número estructural SN del pavimento en función al MR	48
XV.	Diferencia de compactación entre los métodos destructivos y no destructivos.....	50
XVI.	Espesores medidos en calicatas.....	53
XVII.	Espesores de carpeta asfáltica	54
XVIII.	Espesores de base	55
XIX.	Espesores de sub base	57
XX.	Costo de ensayo para el módulo resiliente (MR)	58

XXI.	Costo de ensayo de compactación en carpeta asfáltica	59
XXII.	Costo de medición de estratos de la estructura del pavimento asfáltico.....	59
XXIII.	Costo consolidado de los ensayos propuestos y su duración de ejecución.....	59

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
P	Carga en KN corregido a 40 KN, por la deformación de impacto en KPa
μ Poisson	Coeficiente de Poisson
d_r	Deflexión a la distancia r en KPa
Gmb	Densidad bruta de la mezcla asfáltica compactada
S_o	Desviación estándar de todas las variables
r	Distancia medida desde el centro de carga hacia el geófono
C	Factor de corrección de lectura del deflectómetro en función al índice de plasticidad y su coeficiente de poisson
I	Índice de plasticidad
KPa	Kilo Pascal
KN	Kilo Newton

Km	Kilómetro
PSI	Libra sobre pulgada cuadrada
MR	Módulo de resiliencia
W₁₈	Número de cargas de ejes simples equivalentes a 18 kips (80 KN) calculados conforme el tránsito vehicular
SN	Número estructural del pavimento
ΔPSI	Pérdida de serviciabilidad
% Pasa	Porcentaje de material pasante en tamices con mallas graduadas
Zr	Valor de Z (área bajo la curva de distribución), correspondiente a la curvatura estandarizada para una confiabilidad R

GLOSARIO

AASHTO	Siglas que corresponden a la entidad, <i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i> (Asociación Americana de Oficiales Estatales de Carreteras y Transportes).
ASTM	Siglas que corresponden a la entidad, <i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales).
Base	Capa estructural compuesta de materiales graduados del pavimento que tiene como función de transmitir y distribuir las cargas vehiculares hacia las capas inferiores.
Calicata	Exploración de suelo a cielo abierto en el que se miden, se extraen muestras y se identifican los estratos del pavimento.
Carpeta asfáltica	Capa del pavimento encargada de transmitir las cargas a las estructuras inferiores del pavimento, soportando los efectos abrasivos del tráfico y evitar el paso de humedad hacia las capas inferiores.

CBR	Siglas del ensayo, <i>California Bearing Ratio</i> (Relación de Soporte California).
Compactación	Acción de comprimir o compactar la mezcla asfáltica colocada a una temperatura determinada logrando por lo menos el 97 % de su compactación máxima con 4 % de vacíos.
Deflectometría	Consiste en una prueba no destructiva para la medición de las deflexiones superficiales del pavimento con el que se obtienen datos que se procesan para la evaluación estructural de pavimentos.
Densímetro	Aparato electrónico con capacidad de realizar mediciones de densidad de carpeta asfáltica por medio de pulsos eléctricos.
Estrato	Es cada capa que conforma la estructura del pavimento, desde la superficie de rodadura hasta la subrasante.
Frecuencia (HHz)	Es una unidad medida de la frecuencia de trabajo de un dispositivo hacia los estratos que componen el pavimento.

Georadar	Aparato utilizado en la medición de estratos a través de frecuencias de respuesta de los materiales que componen el pavimento, empleando distancias y tiempos de viaje de onda, por medio de velocidades para la definición de espesores.
Homogéneo	Uniformidad de sub tramos evaluados a lo largo de todo el tramo en análisis.
IRI	International Roughness Index, (Índice Internacional de Rugosidad el pavimento).
LDW	<i>Light Weight Deflectometer</i> , (Deflectómetro de Impacto Liviano).
Módulo de resiliencia	Es el cociente del esfuerzo desviador aplicado y la magnitud de la deformación unitaria recuperable de las capas del pavimento, en especial de la subrasante.
Núcleo asfáltico	Espécimen o muestra de concreto asfáltico compactado extraído sobre una carpeta asfáltica.
Número estructural	Parámetro utilizado en el diseño estructural de pavimentos que presenta la capacidad estructural del conjunto de capas considerando sus propiedades mecánicas, drenaje y espesores.

Poisson	Es una constante elástica que es una medida de la compresibilidad de un material perpendicular a un esfuerzo aplicado, relacionando la deformación horizontal y la deformación vertical de un cuerpo de suelo.
Retrocálculo	Conocido como cálculo inverso, por medio del cual se puede determinar los módulos de elasticidad de las diferentes capas que componen la estructura de un pavimento.
RD-PET	Ruta Departamental, Petén.
SIECA	Siglas de la entidad, Secretaría de Integración Económica Centroamericana.
Sub base	Capa estructural del pavimento con material graduado y controlado, tiene como función distribuir la carga vehicular hacia la subrasante y evitar cambios volumétricos considerables por expansión y contracción de la subrasante.
Subrasante	Capa de suelo natural en el que se funda la estructura del pavimento.

RESUMEN

Para la evaluación, diseño y control de calidad de la estructura de un pavimento, se ha trabajado con métodos convencionales para la obtención de muestras y procesos de datos para tener un resultado requerido, estos métodos requieren de mucho tiempo y trabajo, lo cual va directamente relacionado al daño que se le provoca al pavimento al momento de la realización de las exploraciones, sin embargo, con el avance de la tecnología se ha logrado acceder a métodos no destructivos que ayudan a la obtención de datos mediante ensayos prácticos con los cuales se logran resultados en un tiempo corto a comparación del método tradicional.

Los ensayos destructivos constan de la realización de calicatas, que son exploraciones a cielo abierto, en el cual se obtienen los datos siguientes:

- Medición de los estratos (carpeta asfáltica, base y sub base)
- Muestreo de la subrasante, sub base y base
- Extracción de núcleos del concreto asfáltico

De los datos y muestras tomadas de las calicatas, se proceden a los ensayos en laboratorio, para cada muestra que compone la estructura del pavimento, estos ensayos son:

- Análisis granulométrico
- Límites de consistencia (Atterberg)
- Equivalente de arena
- Densidad y humedad óptima (Proctor)

- Valor soporte de California CBR
- Densidad bruta del núcleo asfáltico (% compactación)
- Medición del espesor de núcleo

Estos ensayos convencionales que son utilizados para calcular los módulos de aporte estructural en la estructura del pavimento, así mismo, con el método no destructivo se puede lograr obtener los mismos datos directamente a través de ensayos utilizando equipo tecnológico que mide las deformaciones y esfuerzos del pavimento a través de geófonos o sensores especiales que permiten realizar las lecturas y registros de datos, entre estos ensayos se muestran los siguientes:

- Estudio deflectométrico con el *Light Weight Deflectometer* (LWD), retrocálculo de módulos.
- Chequeo de compactación de carpeta de pavimento asfáltico a través de un densímetro electrónico utilizando la metodología AASHTO TP-68-05.
- Estudio de medición de estratos a través de Georadar (GPR)

Estos ensayos no destructivos son técnicas avanzadas no invasivas que conservan la integridad del pavimento, sin embargo, los métodos tradicionales o destructivos siguen siendo necesarios para la calibración en función de las características físicas de los materiales que componen la estructura del pavimento.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS

- Planteamiento del problema

Destrucción del pavimento post construcción en la evaluación y obtención de datos para el control de calidad con ensayos convencionales, por la poca confiabilidad en el uso de nuevas tecnologías de los ensayos no destructivos como también el tiempo y logística de trabajo en ambos métodos para la obtención de los datos.

- Preguntas orientadoras

- Principal

¿Con los datos obtenidos por medio de pruebas y evaluaciones no destructivas, se disminuyen el daño al pavimento evaluado, así como los tiempos y rendimiento en la obtención de datos?

- Específicos

- ¿Qué diferencia puede existir entre los ensayos destructivos y no destructivos?

- ¿Cuáles es la diferencia de la metodología y sus características de cada ensayo tanto destructivo y no destructivo?

- ¿En que influyen la precisión de ambos métodos de ensayos en los resultados obtenidos?
- ¿Cómo comparar la confiabilidad entre ambos métodos?

OBJETIVOS

General

Implementar ensayos no destructivos para la comparación de ambos métodos para la evaluación, diseño y control de calidad de una estructura de pavimentos flexibles para la disminución de daños que se general al momento de las evaluaciones convencionales para la orientación de los ensayos de laboratorio de materiales.

Específicos

1. Comparar los beneficios y la diferencia en tiempos de evaluación y obtención de datos, resultados y daños entre los métodos destructivos y no destructivos.
2. Estudiar las características y metodologías de los ensayos no destructivos y los ensayos convencionales.
3. Determinar la diferencia de resultados por medio del número estructural requerido de la estructura del pavimento y su coeficiente de ajuste entre ambos métodos en función de la clasificación de los suelos.
4. Analizar la cantidad y frecuencia de los ensayos de ambos métodos en un mismo tramo de prueba.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación aborda la comparación entre ensayos no destructivos y destructivos, para la evaluación y diseño de estructuras de pavimentos flexibles.

Tanto para la evaluación y diseño de una estructura de un pavimento es necesaria la exploración normalmente a cielo abierto a través de calicatas. Esto se realiza con el fin de extraer muestras aleatorias para la evaluación de cada capa, así como la medición de cada estrato de la estructura del pavimento. Todas estas evaluaciones invasivas comprometen la integridad de la estructura existente, por lo que, en la presente investigación, investiga que sirva de complemento a evaluaciones y diseños estructurales del pavimento, con métodos no destructivos y así disminuir el daño en las estructuras existentes y aumentar la eficiencia al momento de la obtención de datos y disminución de tiempos y costos de ensayos.

La comparación de ambos métodos de evaluación de pavimentos, se realiza con el interés de mejorar la percepción de los métodos de ensayos en el país y que sean validados en el período a mediano plazo por el ente rector. La Dirección General de Caminos regula los parámetros de ensayos destructivos, a través de las Especificaciones Generales Para Construcción de Carreteras y Puentes para las subrasantes, subbases, bases y carpeta de rodadura.

Es de mucha importancia, conocer los resultados entre ambos métodos (destructivos y no destructivos) para determinar las diferencias que puedan existir

y así estimar el nivel de confianza del método no destructivo en los requerimientos de control de calidad.

Para realizar la comparación, se tomarán en cuenta equipo existente y disponible en el país, realizando ensayos de forma paralela, así determinar rendimientos, precisión de los resultados, eficiencia de cada método, costos, medición de área de influencia en el tramo, entre otros parámetros.

Para introducir las variables, se definen cada capa de los pavimentos flexibles siendo estas: sub base, base y carpeta de rodadura, así mismo el cimiento del pavimento (subrasante), al igual que los ensayos propuestos con el método destructivo y el método no destructivo.

En el desarrollo de la investigación se comparan los resultados de cada metodología evaluada, contemplando los tiempos, cantidades de ensayos y costos que cada uno de estos conllevan, se evaluarán tres ensayos cuyos datos se reflejan en resultados comunes, es decir el dato del valor soporte CBR utilizado para calcular el módulo de resiliencia de la subrasante, para luego compararlo con el módulo de resiliencia calculado por medio de retrocálculo de módulos por el método no destructivo. Otro ensayo comparativo es el del porcentaje de compactación de la carpeta asfáltica, utilizando el método convencional de extracción de núcleos de 4 pulgadas de diámetro, comparado con el ensayo con densímetro electrónico el cual por medio de pulsos eléctricos calcula la densidad del concreto asfáltico dando resultados instantáneos.

De los resultados de los ensayos comparados en el que se determinan las variables de interés para el diseño de la estructura del pavimento con ambos métodos de ensayos en el que se determinarán las diferencias entre ambos métodos, ventajas y desventajas, relaciones de tiempo y costo.

ANTECEDENTES

En cuanto a, Balarezo (2017) indica que existen varios métodos no destructivos con los que se pueden complementar la evaluación de la estructura de un pavimento por ejemplo el método de evaluación estructural de los pavimentos flexibles por medio de la viga Benkelman, que es un método no destructivo ya que no altera la integridad del pavimento por ser una evaluación a nivel superficial del pavimento y por medio de métodos matemáticos como por ejemplo el llamado Modelo Hogg, con el que se calcula por medio de las lecturas de las deflexiones se obtiene los parámetros estructurales del pavimento.

Un pavimento existente puede encontrarse con poco o mucho tiempo de ponerse en servicio al usuario, no obstante, en ambos casos los ensayos de evaluación de los materiales que componen la estructura pueden ser mínimos, en su mayoría, por lo que se debe tener en cuenta que estas evaluaciones son destructivas, por lo que el muestreo de materiales demandará la realización de sondeos sobre el pavimento existente, provocando así inconvenientes al paso del tránsito y daño a la estructura existente alterando su integridad estructural. (Ulloa, 2011)

“Para cada capa estructural del pavimento se podrán realizar los siguientes ensayos, mediante la extracción de material (sondeos a cielo abierto): bloques y núcleos de mezcla asfáltica, núcleos de base estabilizada, material en sacos de Subrasante, Base granular y sub-base” (Ulloa, 2011, p.48).

(Tavira, s.f.) menciona como método alternativo para los sondeos a cielo abierto para la determinación de espesores de las capas que componen la

estructura del pavimento, se puede emplear el Georadar, por lo que es un método no destructivo por su técnica que permite localizar los objetos y discontinuidades dentro de un material, a través de una emisión de pulsos cortos de energía electromagnética de alta frecuencia, que, al ser propagada perpendicularmente de la superficie hacia las capas inferiores del pavimento, parte de la energía es absorbida y parte es reflejada hacia la superficie, dando lecturas de las ondas que generan una imagen y por medio de su frecuencia identificar cada capa de la estructura del pavimento.

Guzmán (2009) menciona que entre los métodos que brindan información de los módulos de las capas que componen el pavimento podemos encontrar la deflectometría de impacto. Para la evaluación estructural de un pavimento partiendo de la capacidad portante de las capas del pavimento y la respuesta de la subrasante como cimiento del pavimento, se emplea la deflectometría de impacto, cuyo objetivo es determinar dichas capacidades para un pavimento que está en uso o en condiciones futuras de poder estarlo, al mismo tiempo poder determinar y cuantificar la necesidad de realizar los mantenimientos preventivos y rehabilitaciones para cumplir con la vida útil del pavimento, mediante modelos matemáticos propuestos por diferentes entidades tales como la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (AASHTO, 1993), Lukannen & Han (1991), el método YONAPAVE de Hoffman (2003), el Departamento de transporte del Estado de Washinton (WSDOT, 2005) ó Rohde (1994).

“Mediante estos modelos es posible hallar parámetros como el número estructural efectivo (S_{Nef}) y el módulo resiliente de la subrasante (M_r); los cuales son necesarios para el diseño y programación de mantenimientos y rehabilitación de las carreteras” (Alabarracín, Ávila & Bojorque, 2015, p. 152).

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Diseño y evaluación de pavimentos flexibles

En cuanto, Montejo (2002) menciona que, el diseño y evaluación del estado de los pavimentos es una importante herramienta para mantener un nivel de servicio adecuado y de este modo promover el desarrollo social, cultural y económico de un país, por lo que, el estudio de los pavimentos ha sido y será siendo un mecanismo importante para mantener una adecuada relación entre la integridad de un pavimento con el confort de manejo de los usuarios.

1.1.1. Definición de pavimento

AASHTO (1993) define que, el pavimento es un elemento estructural conformado de capas superpuestas fundadas sobre un terreno llamado subrasante, la función de las capas que conforman la estructura del pavimento es de disipar los esfuerzos hacia la subrasante, ya que, estas capas reciben directamente las cargas desde la superficie del pavimento. Por lo tanto, todo pavimento debe proporcionar una superficie de rodamiento seguro y con un buen confort, capaz de resistir las cargas cortantes y deformaciones que provocan las cargas de tránsito al que se somete en su vida útil.

Para que los pavimentos tengan un desempeño adecuado en servicio, deben cumplir con parámetros de calidad de los materiales que conforman cada capa estructural, tener dimensiones adecuadas, drenaje, además, es de suma importancia el método constructivo, ya que, el buen funcionamiento de un pavimento no solamente depende de la calidad del material, sino también de un

buen control de compactación, humedades óptimas de los materiales de base, por lo que con esto se garantiza la ausencia de deformaciones por la consolidación del material al momento de estar sometido a cargas de tránsito. (AASHTO, 1993)

1.1.2. Pavimentos flexibles

Los pavimentos flexibles están formados por cementos asfálticos en una combinación con agregados graduados que forman el esqueleto granular de la mezcla que lo conforma. En la estructura de un pavimento flexible se conforma de diferentes capas estructurales tales como carpeta asfáltica (rasante), base y subbase, fundadas sobre la subrasante. (*The Asphalt Institute*, 2000)

1.1.3. Estructura del pavimento flexible

Las capas de un pavimento flexible están compuestas comúnmente por tres capas: carpeta asfáltica, base y sub base, estas tres se cimientan sobre la subrasante o terreno natural.

1.1.3.1. Carpeta asfáltica

Montejo (2002) menciona que, la carpeta asfáltica tiene como función principal proteger las capas inferiores ante las cargas abrasivas del tránsito, evitar la filtración de agua que puedan comprometer la integridad de las capas inferiores alterando la humedad óptima de compactación, por lo que es importante que la mezcla que conforma la carpeta asfáltica debe contener el porcentaje óptimo de asfalto y una buena graduación granulométrica de los agregados que lo componen, ya que al no cumplir estos parámetros básicos la carpeta asfáltica puede tener baja estabilidad dando lugar a deformaciones

permanentes, desintegración de agregado, baja rugosidad y pérdida de adherencia en los neumáticos de los vehículos lo cual minimiza la seguridad del usuario.

1.1.3.2. Base

Montejo (2002) menciona que, la capa de base tiene como función la de proporcionar un elemento estructural capaz de transmitir los esfuerzos producidos por el tránsito a las capas inferiores como la sub base y subrasante, de una manera adecuada y disipada para minimizar los daños y deformaciones que puedan sufrir el terreno de fundación.

1.1.3.3. Sub base

La capa de sub base tiene como función principal la disminución de cambios volumétricos en la subrasante asociado con el cambio de humedad y temperatura, expansión que puede ser reflejada y afectar en la rasante, otra función de la capa de sub base es la transición entre capas, que no es más que impedir la contaminación de la capa de base, evitando que los finos de la subrasante contaminen las capas superiores. (Montejo, 2002)

1.1.4. Evaluación de pavimentos flexibles

Comúnmente, la evaluación y medición del estado de un pavimento existente requiere la intervención de ensayos destructivos en el tramo vial, por lo que la práctica de este método altera el estado de la estructura del pavimento y la subrasante, sin embargo, con el avance de la tecnología y nuevos instrumentos de medición del estado del pavimento, conocidas como pruebas no destructivas. (Albarracín et al. 2015)

1.1.5. Diseño estructural de pavimentos flexibles

Secretaría de Integración Económica Centroamericana (SIECA, 2002) indica que, el diseño estructural tanto de pavimentos flexibles como pavimentos rígidos, es determinar principalmente los espesores de la estructura tomando como base de diseño el nivel de tránsito como en las propiedades de los materiales. El período de desempeño de un pavimento está en función de la pérdida de serviciabilidad, que está directamente relacionada con el índice de rugosidad internacional (IRI).

1.1.5.1. Método de diseño AASHTO 93

Para el método de diseño AASHTO 93 se emplea la fórmula siguiente:

Figura 1. Ecuación AASHTO 93 para pavimentos flexibles

$$\log_{10} W_{t18} = Z_R * S_o + 9.36 * \log_{10}(SN+1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{0.40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 * \log_{10} M_R - 8.07$$

Fuente: Guía AASHTO, para el diseño de estructuras de pavimentos, 1993, recuperado de <https://pdfslide.net/documents/guia-aashto-93-version-en-espanol.html?page=19>.

En donde:

- W_{t18} = Número de cargas de ejes simples equivalentes de 18 kips (80 kN) calculadas conforme el tránsito vehicular
- Z_R = Es el valor de Z (área bajo la curva de distribución), correspondiente a la curva estandarizada para una confiabilidad R

- S_o = Desviación estándar de todas las variables
- ΔPSI = Pérdida de serviciabilidad
- Mr = Módulo de resiliencia de la subrasante
- SN = Número estructural

1.2. Evaluación de pavimentos flexibles mediante ensayos destructivos

Para la evaluación de pavimentos flexibles es necesario la realización de exploraciones a cielo abierto, ya que con esta práctica es posible la obtención de las muestras de los materiales que componen la estructura del pavimento, las muestras obtenidas en estos sondeos son alterados, esto quiere decir que se afecta directamente la estructura del pavimento al momento de la realización del muestreo, sin embargo este tipo de muestras deben ser representativas e integrales para poder ser ensayados en un laboratorio y tener los resultados más cercanos a la condición del pavimento evaluado. (Alarcón, 2014)

1.2.1. Calicatas

Son excavaciones que se realizan a cielo abierto, limpiando el área a excavar, tomando en cuenta las medidas según el criterio del laboratorista o cantidad de muestras a extraer en la exploración, teniendo el cuidado adecuado de no contaminar los estratos de la estructura en evaluación, este método cumple con la norma ASTM D 420, para la evaluación de pozos calicatas y trincheras. Las calicatas son importantes en la evaluación por ensayos destructivos ya que

por medio de ellas es posible la obtención de bloques o núcleos de carpeta asfáltica, muestras de base, sub base y subrasante. (Ulloa, 2011)

1.2.2. Núcleos de mezcla asfáltica

Son especímenes de concreto asfáltico, los cuales son extraídos sobre un pavimento terminado, el objetivo de estos núcleos es para determinar el espesor de la carpeta colocada en el tramo o capa respectiva y en el laboratorio se determina el grado de compactación comparándolo con la gravedad específica máxima de la mezcla colocada o la de diseño. (AASHTO T230, 2003)

1.2.3. Estabilidad Marshall

AASHTO T245 (2003) tal como indica este ensayo, mide la deformación plástica de la mezcla asfáltica por medio de un espécimen debidamente compactado, a una temperatura establecida en función a la viscosidad del cemento asfáltico utilizado, por medio de la estabilidad Marshall se logra una correlación matemática del módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica, el cual se utiliza en el diseño de la estructura del pavimento.

1.2.4. Ensayo de CBR

AASHTO T193 (2003) como se indica en esta norma de ensayo, mide la resistencia al corte de un suelo en condiciones de laboratorio controladas, este resultado nos permite correlacionar matemáticamente el módulo de resiliencia de la subrasante, y las capas de suelo superiores del pavimento, con el módulo de la subrasante es una variable necesaria en la ecuación del Número Estructural del pavimento y los módulos de la base y subbase son necesarios en el cálculo del aporte estructural de cada capa que compone la estructura del pavimento.

1.3. Evaluación de pavimentos flexibles mediante ensayos no destructivos

Con el avance de nuevas tecnologías en la construcción de carreteras, la evaluación periódica del estado de un pavimento flexible se ha visto favorecido ya que, por medio de métodos no destructivos es posible conocer las propiedades mecánicas y características físicas medibles del pavimento sin la necesidad de alterar su integridad estructural, esto es gracias a varios métodos o ensayos que utilizan la tecnología de radares, geófonos, entre otros que permiten conocer las respuestas del pavimento al momento de estar sometidos a una carga dinámica controlada, o sometidos a frecuencias que rebotan según la densidad y composición de cada material del pavimento. (Montejo, 2002)

1.3.1. Ensayos de deflectometría por medio del LWD

La finalidad de la evaluación de pavimentos por medio de deflectometría es determinar la respuesta de la subrasante y el conjunto que compone la estructura del pavimento y su capacidad estructural del sistema subrasante-pavimento. (Murillo & Bejarano, 2013)

El LWD (*Light Weight Deflectometer*) por sus siglas en inglés, es el equipo utilizado para la medición de estas deflexiones, por medio de cargas dinámicas y sensores de respuesta llamados geófonos. Por medio de modelos matemáticos se logra el cálculo de módulos del pavimento que hacen posible la evaluación estructural efectiva del pavimento en condiciones controladas sin afectar o alterar la integridad del pavimento al momento del ensayo. (Dynatest, 2020)

1.3.2. Ensayos de determinación de espesores por Georadar

En la evaluación de la estructura del pavimento al momento de medir los espesores de cada capa que la compone, tradicionalmente se recurren a calicatas estratigráficas o extracción de núcleos de la carpeta asfáltica, esta práctica tradicional brinda resultados y datos muy puntuales los cuales demandan tiempo, herramientas y personal de laboratorio, por lo que este método se vuelve poco eficiente y compromete la integridad de la estructura del pavimento evaluado, sin embargo, se tiene la alternativa de los ensayos no destructivos para esta evaluación, como lo es el georadar, el cual se usa como un complemento en este tipo de estudios, por medio de la emisión y recepción de ondas y dependiendo de la profundidad del estudio depende la frecuencia con la que se trabaja, una de las ventajas de este método es que sus resultados se muestran de manera continua a lo largo de todo el tramo evaluado. (Aguilar, 2016)

1.3.3. Ensayos de determinación de compactación por medio de densímetros no nucleares

Uribe (2015) menciona que, un parámetro importante en la evaluación de pavimentos es la compactación de la carpeta asfáltica, por lo que para su verificación se recurre comúnmente a la extracción de núcleos con brocas punta de diamante de cuatro pulgadas de diámetro para luego ser evaluadas en el laboratorio. Hoy en día se cuenta con tecnología amigable con el ambiente y segura para el usuario, tal como el densímetro electrónico no nuclear, dicho densímetro se basa en el principio de la impedancia eléctrica del material, haciendo que el material actúe como un dieléctrico e inversamente proporcional al volumen de aire y el porcentaje de compactación, por lo que esto varía en función a la densidad del material.

Este equipo es muy útil al momento de medir la compactación al momento de la colocación ya que las lecturas son instantáneas y con esto se puede calcular el número de pasadas del rodillo compactador, sin embargo, cabe resaltar que para poder realizar este ensayo es necesario calibrarlo con un núcleo de asfalto para poder corregir el valor de referencia al que se necesita llegar. (Uribe, 2015)

2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Generalidades de los ensayos propuestos

Los ensayos propuestos para la comparación de método destructivo y no destructivo son: determinación de módulos de resiliencia de la subrasante, grados de compactación de pavimentos asfálticos y mediciones de estratos de la estructura del pavimento asfáltico.

2.2. Evaluación de módulos de resiliencia de la subrasante

Para la evaluación de módulos de resiliencia, fue necesario obtener Valor Soporte de California (CBR) cumpliendo la norma AASHTO T 193, correlacionando el resultado con la ecuación de la AASHTO 93, para determinar el módulo de resiliencia de la subrasante, comparado con el módulo calculado con el método de LWD cumpliendo la norma AASHTO TP 456-1 (2017).

$$MR(\text{psi}) = 1500 * \text{CBR} \text{ (Ecuación 1)}$$

El presente estudio compara el valor del CBR del material, además de las características del material para su clasificación, datos que posteriormente es utilizado para el ajuste del módulo de la subrasante por retro cálculo. En el caso del ensayo no destructivo se realizaron 171 mediciones en el tramo en estudio, el cual es la carretera RD-PER-02, que va desde la estación 506+360 hasta la estación 527+610.

En la siguiente figura se muestra la ejecución del ensayo con el LWD, el cual muestra los pesos, la celda de carga y los geófonos, el equipo utilizado es el 32032 *Light Weight Deflectometer* de la marca DYNATEST.

Figura 2. **Ensayo de deflectometría con peso ligero**



Fuente: [Fotografía de Pablo Cox]. (Parqueo IGSS zona 11, 2021), Colección particular, Guatemala.

Este ensayo puede realizarse en la capa de rodadura asfáltica, base, subbase o subrasante. El equipo cuenta con un geófono que se encuentra al centro de la placa de carga, generalmente indica la respuesta de módulo de la capa del

concreto asfáltico. El geófono intermedio indica la respuesta de la capa de base y el geófono exterior indica la respuesta del módulo de la subrasante de la estructura del pavimento.

2.3. Evaluación de compactación de pavimentos asfálticos

Para la evaluación de compactación de carpeta asfáltica se utilizó un método destructivo definido por la norma AASHTO T 230, el cual consiste en la extracción de núcleos del pavimento a evaluar, utilizando una broca con punta de diamante de 4 pulgadas de diámetro. Este núcleo es ensayado en laboratorio para obtener la gravedad específica bruta para luego ser comparado con la muestra estándar o patrón de la mezcla colocada en el mismo tramo. El ensayo comparativo es a través de lecturas de compactación a través de un dispositivo electrónico, el cual por medio de pulsos eléctricos determina la densidad del material evaluado, este dispositivo es un densímetro electrónico no nuclear, el cual cumple con la norma AASHTO TP-68-05, el cual registra una lectura de la densidad del material evaluado comparándolo instantáneamente con la densidad de la muestra patrón, como se trata de un dispositivo electrónico que registra datos a través de pulsos eléctricos, es necesario realizar calibraciones del material a evaluar y así ajustar el factor de lectura del aparato para tener lecturas con datos más representativos.

En la figura 3 se muestra el ensayo de extracción de núcleo simultáneamente con el ensayo de chequeo de compactación con densímetro electrónico. En el punto se extrajo un núcleo de referencia para la calibración del factor de lectura de densidad del pavimento asfáltico, el equipo utilizado para el método destructivo es un taladro con una broca cortadora punta de diamante, y el equipo utilizado en el método no destructivo es un densímetro electrónico

marca TRANSTECH MODEL 301. El tramo evaluado es la RD-SRO-4 del km 44.4 al 49.5 hacia Pueblo Nuevo Viñas.

Figura 3. **Ensayo de compactación de pavimento asfáltico**



Fuente: [Fotografía de Pablo Cox], (Carretera hacia Pueblo Nuevo Viñas, 2019), Colección particular, Santa Rosa, Guatemala.

El ensayo se realiza con la finalidad de obtener el resultado de compactación de ambos métodos, para luego disminuir a la mitad el método destructivo a lo largo del tramo y de ese modo evitar el daño al pavimento asfáltico, sin dejar de obtener datos de la compactación de la misma por medio del método no destructivo, el cual cumple con las Especificaciones Generales

Para La Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos, contenido en la sección 401.18 el cual comprende del Control de calidad, tolerancias y aceptación de la mezcla asfáltica compactada, en el inciso C, numeral 1 y 3, el cual indica que para ensayos de compactación se deben efectuar a cada 400 metros cuadrados del tramo y a distancia longitudinales no menores de 40 metros lineales, sin embargo, de contar con equipo no destructivo, el ensayo se puede efectuar a cada 800 metros cuadrados, reduciendo a la mitad los ensayos no destructivos y aumentando el número de lecturas con el método no destructivo.

2.4. Evaluación y medición de estratos de la estructura del pavimento asfáltico

Para la medición de los estratos de la estructura del pavimento asfáltico se empleó el método destructivo realizando excavaciones a cielo abierto, cumpliendo con la norma ASTM D 420, la excavación se realiza con sumo cuidado de no contaminar un estrato con otro y así poder realizar muestreros representativos, la Dirección General de Caminos de Guatemala acepta la realización de calicatas en un tramo por lo menos a cada 500 metros para la evaluación de espesores, muestreros y estudios estructurales, para el tramo en estudio se realizaron 6 calicatas estratigráficas abarcando una longitud de tramo de 2.5 kilómetros lineales, desde la estación 46+510 hasta la estación 49+040 en donde se midieron los espesores de cada capa de la estructura del pavimento, desde la carpeta asfáltica hasta la subrasante, teniendo como datos los espesores de carpeta asfáltica, base y sub base.

En el mismo tramo evaluado, se realiza la medición por medio del método no destructivo, cumpliendo con la norma ASTM D 4748-98 empleando un georadar mostrado en la figura 4, con una antena de frecuencia de 500 MHz

marca MALA y los datos recopilados como se muestran en la figura 5, son procesados por el software ReflexW, en el cual se calibra los espesores por medio de filtros especiales en donde se identifican los segmentos de espesores de la sección monitoreada, a estos filtros se les aplica un valor de velocidad de frecuencia para calibrar el espesor de cada capa utilizando el dato de las calicatas estratigráficas ubicando la estación de lectura y la estación de excavación, en la figura 6 se muestra esta práctica que se realiza para cada capa medida y se redibuja el espesor en el programa y por medio de puntos localizados los datos se exportan a una hoja en Excel en donde se comparan los resultados obtenidos en la evaluación del georadar. El tramo evaluado es la RD-SRO-4 del km 44.4 al 49.5 hacia Pueblo Nuevo Viñas.

Figura 4. Evaluación de espesores con georadar



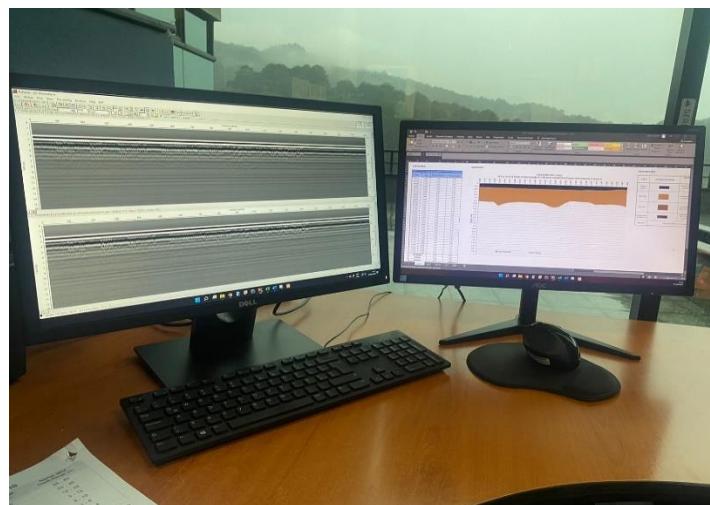
Fuente: [Fotografía de Pablo Cox], (Carretera hacia Pueblo Nuevo Viñas, 2022), Colección particular, Santa Rosa, Guatemala

Figura 5. Recopilación de datos con el monitor del georadar



Fuente: [Fotografía de Pablo Cox], (Carretera hacia Pueblo Nuevo Viñas, 2022), Colección particular, Santa Rosa, Guatemala.

Figura 6. Procesamiento de datos del georadar



Fuente: [Fotografía de Pablo Cox], (Muxbal, Santa Catarina Pinula, 2022), Colección particular, Guatemala.

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

3.1. Comparación de resultados del módulo de resiliencia de la subrasante

Para realizar las comparaciones, se realizaron 21 calicatas del material de subrasante a lo largo de 21 kilómetros de longitud del tramo de la carretera RD-PET-02. De los resultados obtenidos se calculó el percentil 15, el cual nos representa el valor promedio de resultados menos su desviación estándar para tener un resultado representativo, la longitud entre cada sondeo se realizó a no más de 500 metros de distancia, requisito mínimo admitido en la Dirección General de Caminos. La información de CBR obtenido fue proporcionada por el laboratorio de SERPIN (Servicios para Industria) se calculó el módulo resiliente de la subrasante (por medio de la Guía AASHTO 1993). (Herrera-Montealegre, 2014)

Para el análisis se empleó la ecuación No. 1 de la Guía AASHTO 93, establecida por Heukelom y Klomp, el cual es aplicable para suelos finos con un valor de CBR menor del 10%.

$$MR(\text{psi}) = 1500 * \text{CBR} \quad (\text{Ecuación No. 1})$$

Donde:

- MR = Módulo de Resiliencia de la Subrasante
- CBR = Valor Soporte de California
- psi = presión de libra sobre pulgada cuadrada

Para valores de CBR mayores al 10 % se recomienda utilizar la ecuación No. 2, de la Guía AASHTO 2002.

$$MR \text{ (psi)} = 2555 * CBR^{0.64} \quad (\text{Ecuación No. 2})$$

Donde:

- MR = Módulo de Resiliencia de la Subrasante
- CBR = Valor Soporte de California
- psi = presión de libra sobre pulgada cuadrada

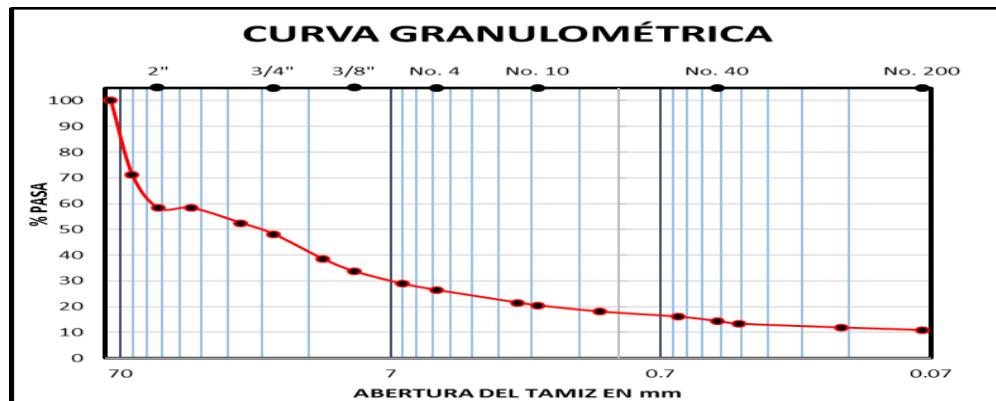
Tal como se indicó, en el siguiente estudio se empleó la ecuación No. 1, ya que, el resultado del CBR de diseño de la subrasante es menor a 10 % (6.68 %), y los resultados de laboratorio fueron los siguientes:

Tabla I. **Análisis granulométrico de la subrasante**

Tamiz	% Pasa	Tamiz	% Pasa	Tamiz	% Pasa
3"	100	1/2"	38.55	No. 16	18.05
2 1/2"	71.25	3/8"	33.61	No. 30	16.01
2"	58.27	1/4"	28.91	No. 40	14.29
1 1/2"	58.27	No. 4	26.46	No. 50	13.31
1"	52.43	No. 8	21.48	No. 100	11.84
3/4"	48.14	No. 10	20.46	No. 200	10.86

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 7. Gráfica de la curva granulométrica de la subrasante



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla II. Resultados de la clasificación del suelo y valor del CBR

CLASIFICACIÓN Y PROPIEDADES DEL SUELO			
Límite líquido	54.79 %	CLASIFICACIÓN	
Límite plástico	22.58 %		
Índice de plasticidad	32.21 %	SISTEMA AASHTO	A-2-7(0)
ENSAYO		RESULTADO	DIMENSIONAL
EQUIVALENTE DE ARENA AASHTO DE ARENA (AASHTO T-176)		20.7	%
% DE HUMEDAD NATURAL AASHTO T-265		12.6	%
PESO UNITARIO SUELTO AASHTO T-19		1279	Kg/m ³
PESO UNITARIO COMPACTADO AASHTO T-19		1460	Kg/m ³
ENSAYO DE CBR		RESULTADO	DIMENSIONAL
PRÓCTOR AASHTO T-180	DENSIDAD SECA MÁXIMA	1927.94	Kg/m ³
	HUMEDAD	17.90	%
VALOR SOPORTE DE CALIFORNIA AASHTO T-193		6.68	%

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Para el cálculo del módulo de la subrasante utilizando el valor de CBR de 6.68 % en la ecuación No. 1, se tiene el resultado siguiente:

$$MR(\text{psi}) = 1500 * \text{CBR}$$

$$MR(\text{psi}) = 1500 * 6.68$$

$$MR(\text{psi}) = 10,020 \text{ psi}$$

Del método no destructivo se realizaron 171 mediciones de deflectometría a lo largo del tramo indicado de 21 kilómetros a no más de 125 metros de distancia entre cada sondeo, del resultado obtenido del grupo de datos de 171 mediciones, se calculó el módulo de resiliencia (MR) de la subrasante por medio de la ecuación de retrocálculo de la metodología AASHTO 93, el cual se calibró por medio del factor C, el cual es determinado por la AASHTO por medio de la clasificación del suelo en estudio, en la tabla siguiente se muestran los valores del factor C, en función del tipo de suelo y su índice de plasticidad, así como su coeficiente de Poisson para el material en estudio.

Tabla III. Factor C y módulo de Poisson del módulo de la subrasante

C	Suelo	IP	μ Poisson
0.33	Arcillas	>10	0.50
0.40	Limos	<10	0.35
0.50	Arenas	<6	0.35
0.70	Arenas	<3	0.35
1.00	Gravas	0	0.35

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Para el cálculo del módulo de la subrasante por medio de retrocálculo, se considera la carga aplicada a la celda, la deformación registrada por los geófonos

localizados en los puntos específicos para el análisis, y el resultado se obtiene por medio de la ecuación No. 3:

$$MR(\text{psi}) = \left(\frac{(1 - \mu_s^2) * P * 22.5}{d_r * r} \right) * 145.038 \quad (\text{Ecuación No. 3})$$

Donde:

- MR = Módulo de Resiliencia de la Subrasante
- μ_s = Módulo de Poisson
- P = Carga en Kn corregido a 40 kn, por la deformación de impacto en kpa
- d_r = Deflexión a la distancia r en Kpa
- r = Distancia medida desde el centro de carga hacia el geófono

Para ejemplificar el cálculo por medio de retrocálculo, se toma la lectura de la deflexión realizada en la estación 508+610 en el eje central, la carga aplicada corregida a 40 Kn es de:

$$MR(\text{psi}) = \left(\frac{(1 - 0.35^2) * 102.25 * 22.5}{25 * 0.6} \right) * 145.038 = 19,520 \text{ psi}$$

Para que los valores calculados del MR a través de retrocálculo sean consistentes con los valores obtenidos en laboratorio, la metodología de AASHTO 93 recomienda realizar los ajustes en función de la clasificación del suelo, este ajuste se realiza por medio del factor C , para el cálculo de ajuste se toma el valor C de 0.5, dado que, el material es una arena limosa, por lo que la ecuación del módulo quedaría de la manera siguiente:

$$MR(\text{psi}) = C * \left(\frac{(1 - \mu_s^2) * P * 22.5}{d_r * r} \right) * 145.038 \text{ psi}$$

Donde:

- MR = Módulo de Resiliencia de la Subrasante
- μ_s = Módulo de Poisson, 0.35 por ser un suelo con alto porcentaje de arena
- P = Carga en Kn corregido a 40 kn, por la deformación de impacto en kpa
- d_r = Deflexión a la distancia r en Kpa
- r = Distancia medida desde el centro de carga hacia el geófono
- C = Factor de corrección del módulo de resiliencia

Con la nueva ecuación ajustada, el módulo de resiliencia queda de la manera siguiente:

$$MR(\text{psi}) = 0.5 * \left(\frac{(1 - 0.35^2) * 102.25 * 22.5}{25 * 0.6} \right) * 145.038 = 9,760 \text{ psi}$$

Con el nuevo módulo de resiliencia por retrocálculo el resultado es de 9,760 psi, comparado con el del método destructivo que es de 10,020 psi, dando una diferencia de 260 psi, siendo esta un valor mínimo al momento de diseñar el pavimento en su número estructural requerido para un determinado número de ejes equivalentes en un período proyectado.

En las tablas ilustradas en las siguientes figuras se muestran los resultados de las mediciones realizadas con el LWD, siendo estos 171 puntos de chequeo.

Figura 8. Datos de resultados obtenidos de deflectometría LWD

Point	Location	Location	Coordenadas		Stress	Dist. 3	Def. 3	MÓDULO DE SUBRASANTE			
			km	Latitud				kPa	mm	Micron	MPa
No.											psi
1	506+360 c1	506.360	16.994076	-89.895661	102	600	9	372.0	53958	0.50	26979
2	est 506+485	506.485	16.994069	-89.895775	103	600	15	225.4	32693		16346
3	506+610 c1	506.610	16.995345	-89.894766	104	600	33	104.8	15195		7597
4	506+735 c2	506.735	16.996823	-89.894335	101	600	18	184.2	26714		13357
5	506+860 c1	506.860	16.996965	-89.894283	95	600	36	86.5	12550		6275
6	506+985 c2	506.985	16.998009	-89.893983	96	600	17	191.5	27768		13884
7	507+110 c1	507.110	16.998940	-89.893350	96	600	13	250.3	36297		18149
8	507+235 c2	507.235	16.999851	-89.892673	98	600	44	73.8	10697		5349
9	507+360c1	507.360	17.000713	-89.891997	95	600	22	145.4	21088		10544
10	507+485 c2	507.485	17.001618	-89.891282	100	600	23	142.7	20699		10349
11	507+610 c1	507.610	17.002498	-89.890649	99	600	8	408.6	59260		29630
12	507+735c2	507.735	17.003346	-89.889946	99	600	21	155.1	22500		11250
13	507+860c1	507.860	17.004233	-89.889234	104	600	15	228.2	33090		16545
14	507+985c2	507.985	17.004830	-89.888248	99	600	22	145.7	21128		10564
15	508+110c1	508.110	17.005402	-89.887294	94	600	21	147.8	21439		10720
16	508+235c2	508.235	17.006225	-89.885802	98	600	31	102.7	14891		7445
17	508+360c1	508.360	17.006533	-89.885394	96	600	11	299.3	43408		21704
18	508+485c2	508.485	17.007023	-89.884485	106	600	38	91.5	13271		6636
19	508+610c1	508.610	17.007556	-89.883514	102	600	25	134.6	19520		9760
20	508+735c2	508.735	17.007485	-89.882428	100	600	57	57.4	8324		4162
21	508+860c1	508.860	17.007438	-89.881306	104	600	12	285.9	41462		20731
22	508+985c2	508.985	17.007293	-89.880250	99	600	13	250.6	36346		18173
23	509.110c1	509.110	17.007204	-89.879229	99	600	18	184.4	26745		13372
24	509.235c2	509.235	17.007072	-89.878060	98	600	26	122.5	17762		8881
25	509+360c1	509.360	17.006986	-89.876989	98	600	7	458.3	66476		33238
26	509+485c2	509.485	17.008365	-89.875465	100	600	11	297.7	43171		21585
27	509+610c1	509.610	17.008333	-89.875438	100	600	41	81.0	11741		5871
28	509+735c2	509.735	17.008412	-89.874408	100	600	28	118.5	17193		8597
29	509+860c1	509.860	17.008751	-89.873335	101	600	13	261.5	37930		18965
30	509.985c2	509.985	17.009438	-89.872541	103	600	13	255.2	37011		18505
31	510+110c1	510.110	17.010181	-89.871761	102	600	15	224.5	32560		16280
32	510+235c2	510.235	17.010403	-89.870782	99	600	25	129.0	18714		9357
33	510+360c1	510.360	17.010586	-89.869752	98	600	8	401.7	58266		29133
34	510+485c2	510.485	17.011310	-89.868898	103	600	21	161.9	23485		11742
35	510+610c1	510.610	17.011486	-89.867920	102	600	25	133.8	19409		9704
36	510+735c2	510.735	17.010790	-89.866431	105	600	24	141.8	20567		10283
37	510+860c1	510.860	17.010771	-89.865727	102	600	13	256.9	37263		18632
38	510+985c2	510.985	17.011068	-89.864661	104	600	11	302.9	43937		21968
39	511+110c1	511.110	17.011375	-89.863555	96	600	20	157.4	22829		11415
40	511+235c2	511.235	17.010829	-89.862280	101	600	11	315.7	45795		22897
41	511+360c1	511.360	17.010570	-89.861410	104	600	10	341.4	49516		24758
42	511+485c2	511.485	17.010917	-89.860327	101	600	15	224.8	32600		16300
43	511+610c1	511.610	17.011401	-89.859316	104	600	13	262.6	38089		19045
44	511+735c2	511.735	17.011654	-89.858207	104	600	19	179.5	26040		13020
45	511+860c1	511.860	17.011728	-89.857054	101	600	15	222.3	32242		16121
46	est 511+985c2	511.985	17.011760	-89.855906	101	600	8	414.1	60056		30028
47	est 512+110c1	512.110	17.011681	-89.854763	99	600	14	232.7	33750		16875
48	512+235c2	512.235	17.012351	-89.852360	100	600	17	189.2	27443		13721
49	est 512+360c1	512.360	17.012302	-89.852559	102	600	14	240.3	34857		17429
50	est 512+485c2	512.485	17.012367	-89.851443	105	600	16	215.3	31221		15611

Continuación de la figura 8.

51	est 512+610c1	512.610	17.012254	-89.849158	102	600	25	135.6	19671		9836
52	est 512.735c2	512.735	17.012235	-89.849106	105	600	10	361.3	52400		26200
53	est 512+860c1	512.860	17.011908	-89.848024	103	600	29	118.3	17165		8582
54	est 612+985c2	512.985	17.011728	-89.846867	101	600	9	359.3	52112		26056
55	est 513+110c1	513.110	17.012104	-89.845773	103	600	49	70.0	10152		5076
56	est 513+235c2	513.235	17.012546	-89.844769	101	600	27	123.4	17897		8949
57	est 513+360c1	513.360	17.012904	-89.843734	102	600	16	209.1	30326		15163
58	est 513+485c2	513.485	17.013148	-89.842563	101	600	14	236.6	34318		17159
59	est 513+610c1	513.610	17.013423	-89.841449	104	600	18	187.3	27161		13580
60	est 513+735c2	513.735	17.013461	-89.840339	104	600	22	155.2	22507		11254
61	est. 513+860c1	513.860	17.012909	-89.838904	105	600	16	214.9	31171		15586
62	est 513+985c2	513.985	17.012581	-89.838236	105	600	11	313.4	45449		22724
63	est 514+110c1	514.110	17.011988	-89.837246	105	600	8	430.9	62492		31246
64	est 514+235c2	514.235	17.012004	-89.836117	104	600	12	284.3	41230		20615
65	est 514+360c1	514.360	17.012336	-89.835048	101	600	19	178.0	25823		12912
66	est 514+485c2	514.485	17.012600	-89.833917	101	600	21	160.2	23231		11615
67	est 514+610c1	514.610	17.012888	-89.832794	101	600	22	149.4	21665		10832
68	est 514+735c2	514.735	17.012507	-89.831751	106	600	16	214.5	31111		15555
69	est 514+860c1	514.860	17.012284	-89.830642	102	600	37	90.1	13069		6534
70	est 514+985c2	514.985	17.012624	-89.829524	102	600	13	256.9	37263		18632
71	est 515+110c1	515.110	17.012480	-89.828374	100	600	23	143.1	20751		10375
72	est 515+235c2	515.235	17.012824	-89.827323	100	600	22	149.9	21748		10874
73	est 515+360c1	515.360	17.013419	-89.826362	99	600	30	109.8	15927		7963
74	est 515+485c2	515.485	17.014078	-89.825453	105	600	34	101.3	14692		7346
75	est 515+610	515.610	17.014818	-89.824632	103	600	36	94.5	13699		6850
76	515.735	515.735	17.016706	-89.823709	98	600	26	123.0	17835		8918
77	515.86	515.860	17.016757	-89.823685	96	600	16	194.6	28231		14116
78	515.95	515.985	17.017730	-89.823154	102	600	20	168.2	24394		12197
79	516.11	516.110	17.017605	-89.822154	99	600	20	164.7	23885		11943
80	516.235	516.235	17.016675	-89.821539	100	600	27	121.2	17573		8786
81	516.36	516.360	17.016135	-89.820540	97	600	19	168.5	24441		12221
82	516.485	516.485	17.016593	-89.819476	103	600	18	187.6	27216		13608
83	516.61	516.610	17.016006	-89.818693	98	600	10	322.1	46719		23359
84	516.735	516.735	17.014917	-89.818526	106	600	18	189.0	27411		13705
85	516.86	516.860	17.014604	-89.817491	99	600	21	159.0	23058		11529
86	516.985	516.985	17.014448	-89.816258	98	600	11	302.2	43833		21917
87	517.11	517.110	17.014714	-89.815154	102	600	32	105.5	15304		7652
88	517.235	517.235	17.014868	-89.813987	96	600	25	125.8	18242		9121
89	517.36	517.360	17.014970	-89.812869	101	600	23	143.0	20746		10373
90	517.485	517.485	17.014867	-89.811727	98	600	21	150.7	21864		10932
91	517.735	517.610	17.014473	-89.809717	97	600	29	110.4	16015		8007
92	517.735	517.735	17.014549	-89.809401	101	600	47	70.8	10271		5135
93	517.86	517.860	17.014811	-89.808318	96	600	12	272.7	39550		19775
94	517.985	517.985	17.014336	-89.807542	98	600	15	218.0	31624		15812
95	518.11	518.110	17.013701	-89.808415	96	600	8	421.2	61086		30543
96	518.36	518.235	17.012883	-89.807953	102	600	24	141.1	20464		10232
97	518.36	518.360	17.012265	-89.806940	103	600	13	256.3	37178		18589
98	518.485	518.485	17.011943	-89.805852	102	600	5	647.7	93935		46968
99	518.61	518.610	17.011878	-89.804703	103	600	33	101.9	14781		7390
100	518.735	518.735	17.012509	-89.803722	102	600	53	63.4	9200		4600
101	est 518+860 c1	518.860	17.013257	-89.802734	101	600	19	174.9	25370		12685
102	est 518+985c2	518.985	17.013917	-89.801892	97	600	16	204.4	29651		14826
103	est 519+110c1	519.110	17.014625	-89.801028	99	600	10	324.9	47130		23565
104	est 519+235c2	519.235	17.015366	-89.800121	97	600	16	201.6	29242		14621
105	est 519+360c1	519.360	17.016096	-89.799204	102	600	5	669.1	97044		48522

Continuación de la figura 8.

106	est 519+485c2	519.485	17.016605	-89.798199	104	600	13	262.4	38059		19029
107	est 519+610c1	519.610	17.017157	-89.796597	103	600	18	188.3	27310		13655
108	est 519+735c2	519.735	17.017039	-89.796045	104	600	10	352.9	51183		25591
109	est 519+860	519.860	17.016916	-89.794950	102	600	13	258.2	37447		18723
110	est 519+985c2	519.985	17.017230	-89.793820	105	600	10	333.3	48342		24171
111	est 520+110c1	520.110	17.017495	-89.792703	103	600	50	68.0	9863		4932
112	est 520+235c2	520.235	17.017692	-89.791510	101	600	54	61.2	8872		4436
113	est 520+360c1	520.360	17.017393	-89.790525	101	600	31	107.2	15550		7775
114	est 520+485c2	520.485	17.016456	-89.790250	100	600	60	55.0	7972		3986
115	est 520+610c1	520.610	17.015979	-89.789240	103	600	5	680.1	98635		49317
116	est 520+735c2	520.735	17.015227	-89.788493	104	600	16	213.2	30923		15461
117	est 520+860c1	520.860	17.014295	-89.787828	108	600	9	380.8	55226		27613
118	est 520+985c2	520.985	17.013649	-89.786872	102	600	6	590.4	85627		42814
119	est 521+110c1	521.110	17.013053	-89.785933	104	600	8	425.7	61746		30873
120	est 521+235c2	521.235	17.012375	-89.785014	104	600	9	396.1	57455		28728
121	est 521+360c1	521.360	17.011725	-89.784159	105	600	14	246.8	35795		17897
122	est 521+485c2	521.485	17.011001	-89.783227	104	600	12	285.2	41363		20682
123	est 521+610c1	521.610	17.010599	-89.782204	105	600	12	287.9	41761		20880
124	est 521+735c2	521.735	17.010239	-89.781093	99	600	67	48.9	7087		3544
125	est 521+860c1	521.860	17.010526	-89.779978	98	600	57	56.8	8234		4117
126	est 521+985c2	521.985	17.011398	-89.777911	104	600	7	488.9	70908		35454
127	est 522+110c1	522.110	17.011412	-89.777859	103	600	9	377.8	54797		27399
128	est 522+235c2	522.235	17.011637	-89.776765	106	600	10	347.7	50431		25216
129	est 522+360c1	522.360	17.011868	-89.775708	105	600	17	199.3	28911		14456
130	est 522+485c2	522.485	17.011995	-89.774471	102	600	17	200.7	29113		14557
131	est 522+610c1	522.610	17.012511	-89.773536	102	600	10	346.1	50195		25098
132	est 522+735c2	522.735	17.012939	-89.772470	104	600	13	262.4	38059		19029
133	est 522+860c1	522.860	17.013434	-89.771411	104	600	8	427.8	62045		31022
134	est 522+985c2	522.985	17.013972	-89.770358	102	600	21	157.3	22819		11410
135	est 523+110c1	523.110	17.014446	-89.769357	103	600	14	242.9	35227		17613
136	est 523+235c2	523.235	17.014829	-89.768284	104	600	9	380.3	55151		27575
137	est 523+360c1	523.360	17.015043	-89.767190	104	600	11	310.1	44979		22489
138	est 523+485c2	523.485	17.015223	-89.766028	101	600	13	262.4	38056		19028
139	est 523+610c1	523.610	17.015342	-89.764911	101	600	12	277.9	40302		20151
140	est 523+735c2	523.735	17.015140	-89.763746	107	600	10	351.0	50908		25454
141	est 523+860c1	523.860	17.014790	-89.762636	101	600	6	553.9	80340		40170
142	est 523+985c2	523.985	17.014438	-89.761546	103	600	6	598.1	86750		43375
143	est 524+110c1	524.110	17.014073	-89.760475	102	600	15	223.0	32348		16174
144	est 524+235c2	524.235	17.013650	-89.759349	104	600	11	312.1	45268		22634
145	est 524+360c1	524.360	17.013234	-89.758315	106	600	8	456.4	66195		33097
146	est 524+485c2	524.485	17.012955	-89.757183	108	600	10	366.5	53158		26579
147	est 524+610c1	524.610	17.012592	-89.756058	101	600	11	301.1	43677		21839
148	est 524+735c2	524.735	17.012230	-89.755028	101	600	19	171.9	24933		12467
149	est 524+860c1	524.860	17.011829	-89.753902	96	600	16	194.1	28149		14074
150	est 524+985c2	524.985	17.011342	-89.752908	100	600	47	70.0	10155		5077
151	est 525+110c1	525.110	17.010483	-89.752130	101	600	11	312.6	45340		22670
152	est 525+235c2	525.235	17.009939	-89.751163	100	600	28	119.4	17312		8656
153	est 525+360c1	525.360	17.009671	-89.750091	101	600	16	203.5	29513		14756
154	est 525+485c2	525.485	17.009405	-89.748940	103	600	17	199.4	28917		14458
155	est 525+610c1	525.610	17.008901	-89.747902	96	600	86	36.7	5328		2664
156	est 525+735c2	525.735	17.009128	-89.746908	100	600	20	167.9	24353		12176
157	est 525+860c1	525.860	17.008987	-89.745888	99	600	9	381.3	55307		27653
158	est 525+985c2	525.985	17.008155	-89.745002	96	600	7	430.8	62478		31239
159	est 526+110c1	526.110	17.007662	-89.743995	100	600	15	218.6	31712		15856
160	est 526+235c2	526.235	17.007128	-89.742925	101	600	12	276.0	40037		20019
161	est 526+360c1	526.360	17.006251	-89.740909	100	600	20	167.9	24349		12174

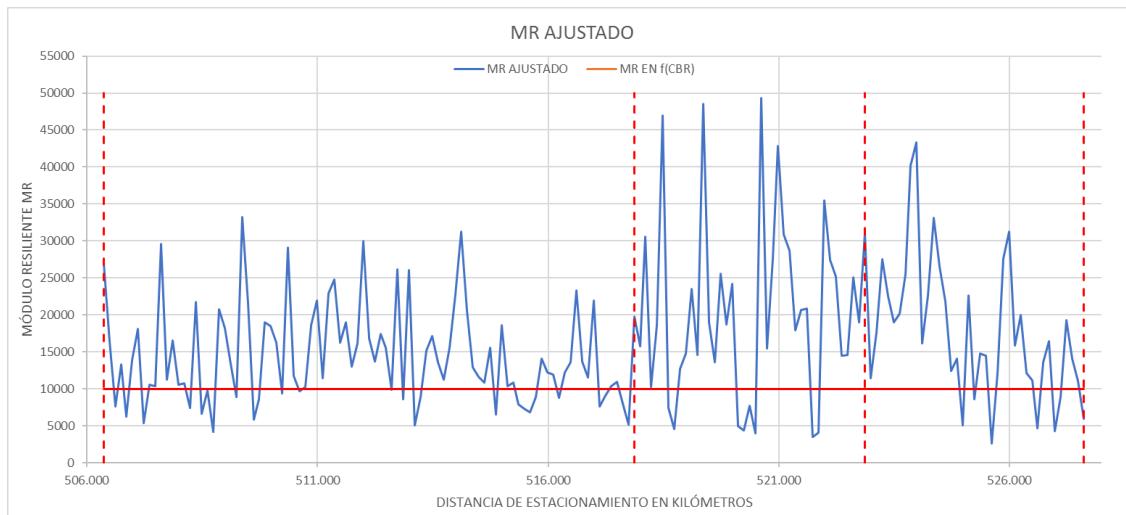
Continuación de la figura 8.

162	est 526+485c2	526.485	17.005207	-89.738828	100	600	21	153.7	22297		11149
163	est 526+610c1	526.610	17.005207	-89.738828	96	600	49	64.8	9398		4699
164	est 526+735c2	526.735	17.004811	-89.737763	100	600	18	187.1	27136		13568
165	est 526+860c1	526.860	17.004417	-89.736629	99	600	14	226.5	32854		16427
166	est 526+985c2	526.985	17.003826	-89.735663	99	600	55	59.4	8620		4310
167	est 527+110c1	527.110	17.002689	-89.734381	104	600	28	122.5	17770		8885
168	est 527+235c2	527.235	17.002338	-89.733959	103	600	13	266.7	38684		19342
169	est 527+360c1	527.360	17.001060	-89.732256	103	600	17	194.9	28269		14134
170	est 527+485c2	527.485	17.001101	-89.732187	100	600	22	151.9	22028		11014
171	est 527+610c1	527.610	17.000533	-89.731028	98	600	39	82.4	11952		5976

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

De los resultados del MR de la subrasante corregida, se muestra la gráfica de los módulos por estación y divididos por tramos homogéneos (determinado a criterio visual del diseñador). En este caso se dividió en tres tramos. La línea recta horizontal en rojo representa el MR en función del valor de CBR.

Figura 9. **MR de retrocálculo vs MR (CBR)**



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

En la figura 9 se muestran los resultados de los módulos de cada punto evaluado el cual por la homogeneidad de los datos se dividieron en 3 tramos homogéneos los cuales se detallan en la tabla siguiente:

Tabla IV. Tramos homogéneos de MR de retrocálculo

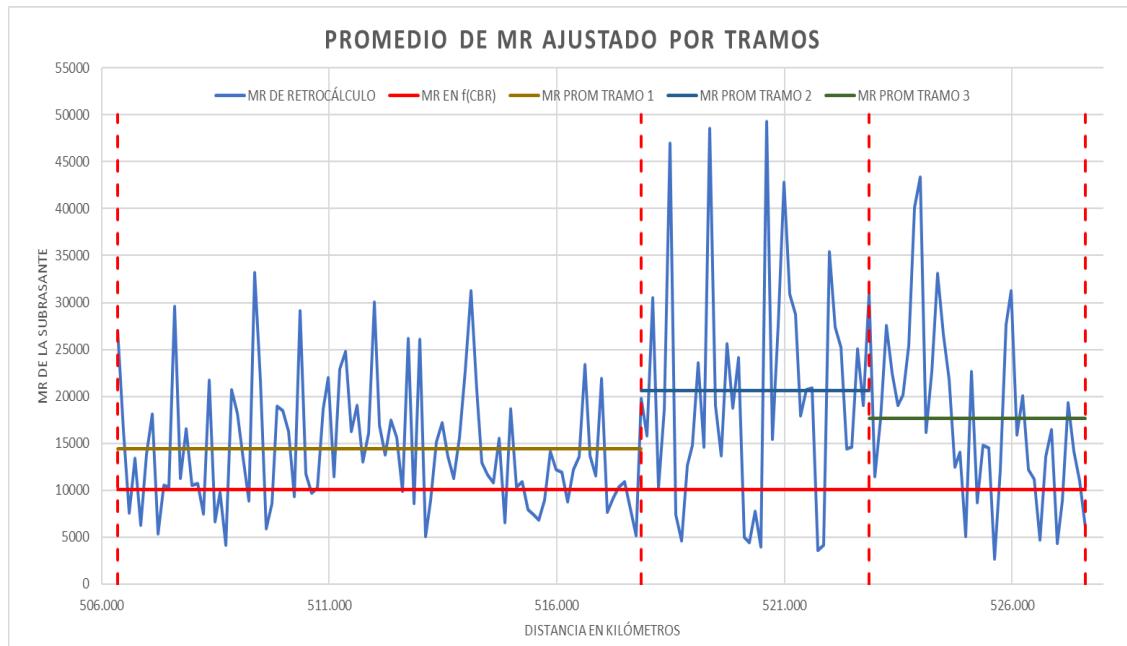
TRAMOS	ESTACIONES	MR PROMEDIO	MR (CBR)
1	506+360 - 517+860	14455	10020
2	517+860 - 522+860	20620	10020
3	522+860 - 527+610	17659	10020

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

De los resultados obtenidos por cada tramo, se puede observar que el MR de retrocálculo es mayor que el MR en función del CBR del material, por lo que se procede a calcular la variación de los datos y su dispersión por medio de su desviación estándar para luego utilizar el dato de MR menos su desviación estándar y del resultado obtenido se procede a calcular su coeficiente de varianza, si el valor es menor del 35 % se puede utilizar sólo el promedio, sin embargo, en los tres tramos el coeficiente de varianza supera el 40 %, por lo que se opta utilizar el resultado de la diferencia del promedio del MR por retrocálculo y su desviación estándar, esta práctica emula al percentil 15 del CBR estimado y este procedimiento por experiencia del Ingeniero Rodrigo Rubio, le ha dado buenos resultados los cuales se pueden verificar en los siguientes datos y gráficas.

En la figura 13 se puede observar la diferencia de valores de MR de los tramos homogéneos y el MR en función del CBR del material.

Figura 10. Valores promedio de MR de retrocálculo por tramos homogéneos



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

En la figura 10 se puede observar que el promedio de los valores del MR de retrocálculo son mayores con gran diferencia en relación al valor del MR en función del CBR mostrado con la línea roja horizontal, la máxima diferencia se puede observar en el tramo 2, seguido por la diferencia del tramo 3 y tramo 1.

En la tabla V se muestran los datos del promedio de MR de cada tramo homogéneo y su desviación estándar, de esto se saca la diferencia entre estos

valores y luego se calcula el coeficiente de varianza el cual es el cociente de los valores promedio y la diferencia calculada.

Tabla V. Ajuste del MR de retrocálculo por su desviación estándar y su coeficiente de varianza

TRAMOS	MR PROMEDIO a	DESV. EST. b	MR PROM – DESV c = a – b	VARIANZA d = c/a *100
1	14455	6650	7804	54 %
2	20620	12349	8271	40 %
3	17659	9502	8157	46 %

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Para los valores de retrocálculo, dado que los valores del coeficiente de varianza superan al 35%, como se indicó anteriormente se ajusta nuevamente el valor del promedio para disminuir la diferencia de valores, para lo cual se toma el valor de MR menos su desviación estándar y se toma como MR de diseño, tal como se muestra en la tabla siguiente.

Tabla VI. MR de diseño y MR (CBR)

TRAMOS	MR PROMEDIO	DESV. EST.	MR DISEÑO	VARIANZA	MR (CBR)
1	14455	6650	7804	54 %	10020
2	20620	12349	8271	40 %	10020
3	17659	9502	8157	46 %	10020

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Empleando la ecuación de la Guía AASHTO 93 mostrada en la figura 1, donde se indica el uso de las variables del módulo de resiliencia para el cálculo del número estructural del pavimento, se utilizaron los datos siguientes los cuales

fueron los mismos para cada caso a modo de compararlos en las mismas condiciones de diseño, siendo estos 10 años de período de vida, 8,000,000 de ejes equivalentes, un porcentaje de confiabilidad de 85%, un 0.45 de error normal combinado por tratarse de un pavimento nuevo y una diferencia de serviciabilidad de 2. En las siguientes tablas se muestra los resultados de cada SN (número estructural) del tramo general con el MR de CBR y por cada tramo con el MR de diseño de retrocálculo.

Tabla VII. Número estructural con MR (CBR)

Tramo Homogéneo GENERAL	
Estación inicial (km)	Estación Final (km)
506+360	527+610
Periodo de vida de la vía	10
ESAL (8.2 ton)	8,000,000
Zr	-1.036
R %	85 %
So	0.45
ΔIPS	2.00
Po	4.00
Pt	2.00
MR (CBR) LABORATORIO	10,020
SN req	4.02

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla VIII. Número estructural con MR de diseño primer sub tramo

Tramo Homogéneo # 1	
Estación inicial (km)	Estación Final (km)
506+360	517+860
Periodo de vida de la vía	10
ESAL (8.2 ton)	8,000,000
Zr	-1.036
R %	85%
So	0.45
ΔIPS	2.00
Po	4.00
Pt	2.00
Mr diseño tramo 1	7,804
SN req	4.37

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla IX. Número estructural con MR de diseño segundo sub tramo

Tramo Homogéneo # 2	
Estación inicial (km)	Estación Final (km)
517+860	522+860
Periodo de vida de la vía	10
ESAL (8.2 ton)	8,000,000
Zr	-1.036
R %	85%
So	0.45
ΔIPS	2.00
Po	4.00
Pt	2.00
Mr diseño tramo 2	8,271
SN req	4.29

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla X. Número estructural con MR de diseño tercer sub tramo

Tramo Homogéneo # 3	
Estación inicial (km)	Estación Final (km)
5.700	19.000
Periodo de vida de la vía	10
ESAL (8.2 ton)	8,000,000
Zr	-1.03643
R	85%
So	0.45
ΔIPS	2.00
Po	4.00
Pt	2.00
Mr de diseño tramo 3	8,157
SN req	4.31

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

De acuerdo a los resultados obtenidos, en la tabla XI se muestran el resumen de cada valor calculado, en el cual se puede observar las diferencias a nivel de número estructural del pavimento.

Tabla XI. Resumen de resultados de número estructural

TRAMOS	MR DISEÑO	SN	MR f(CBR)	SN	DIFERENCIAS SN
1	7804	4.37	10020	4.02	0.35
2	8271	4.29	10020	4.02	0.27
3	8157	4.31	10020	4.02	0.29

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

3.2. Comparación de ensayos de compactación de la carpeta asfáltica por el método destructivo

Para la comparación de este ensayo, para el método destructivo se realizó la extracción de núcleos de asfaltos en carpeta para luego ensayarlos en el laboratorio y así calcular su densidad y relacionándolo con la muestra patrón con características ya establecidas de la mezcla, para el cálculo de compactación se empleó la ecuación No. 4 para determinar el porcentaje de compactación en relación a la densidad de la muestra patrón del laboratorio.

$$\% \text{ Comp.} = \frac{\text{Gmb núcleo}}{\text{Gmb MAC Lab.}} * 100 \text{ (Ecuación No. 4)}$$

- % Comp. = Porcentaje de compactación
- Gmb núcleo = Densidad bruta del núcleo asfáltico
- Gmb MAC Lab.= Densidad bruta de la mezcla asfáltica en caliente en laboratorio

El tramo en análisis tiene una longitud de 4.88 kilómetros ubicado en la carretera RD-SRO-4 del km 44.4 al 49.5 hacia Pueblo Nuevo Viñas, los resultados generales de compactación se muestran en la tabla de la figura 14.

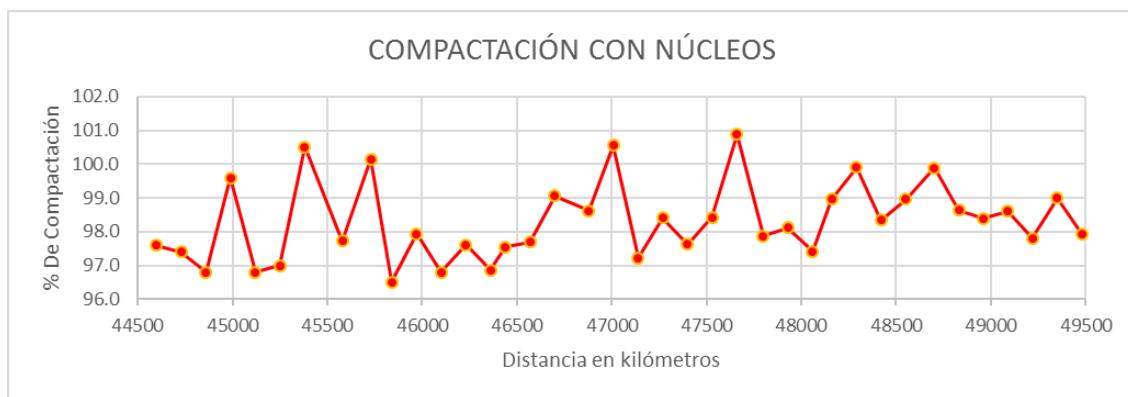
Figura 11. Resultados de compactación de núcleos extraídos

Test.No.	Fecha Colocación	Fecha Extracción Núcleo	Estación Sección Completa	Gmb laboratorio	Gmb núcleo	% Compactación
1	06/02/2019	13/02/2019	44+600	2.4979	2.4373	97.6
2	06/02/2019	13/02/2019	44+730	2.4979	2.4334	97.4
3	06/02/2019	13/02/2019	44+860	2.4979	2.4172	96.8
4	07/02/2019	13/02/2019	44+990	2.4961	2.4863	99.6
5	07/02/2019	13/02/2019	45+120	2.4961	2.4167	96.8
6	07/02/2019	13/02/2019	45+250	2.4961	2.4224	97.0
7	07/02/2019	13/02/2019	45+380	2.4961	2.5090	100.5
8	08/02/2019	18/02/2019	45+580	2.4870	2.4307	97.7
9	08/02/2019	18/02/2019	45+730	2.4870	2.4907	100.1
10	08/02/2019	18/02/2019	45+840	2.4870	2.4004	96.5
11	11/02/2019	18/02/2019	45+970	2.4985	2.4469	97.9
12	11/02/2019	18/02/2019	46+100	2.4985	2.4197	96.8
13	11/02/2019	18/02/2019	46+230	2.4985	2.4389	97.6
14	11/02/2019	18/02/2019	46+360	2.4985	2.4201	96.9
15	12/02/2019	21/02/2019	46+440	2.4973	2.4361	97.6
16	12/02/2019	21/02/2019	46+570	2.4973	2.4398	97.7
17	12/02/2019	21/02/2019	46+700	2.4973	2.4737	99.1
18	13/02/2019	21/02/2019	46+880	2.4982	2.4639	98.6
19	13/02/2019	21/02/2019	47+010	2.4982	2.5119	100.5
20	13/02/2019	21/02/2019	47+140	2.4982	2.4289	97.2
21	14/02/2019	25/02/2019	47+270	2.4825	2.4429	98.4
22	14/02/2019	25/02/2019	47+400	2.4825	2.4236	97.6
23	14/02/2019	25/02/2019	47+530	2.4825	2.4433	98.4
24	15/02/2019	25/02/2019	47+660	2.4915	2.5134	100.9
25	15/02/2019	25/02/2019	47+800	2.4915	2.4387	97.9
26	15/02/2019	25/02/2019	47+930	2.4915	2.4445	98.1
27	15/02/2019	25/02/2019	48+060	2.4915	2.4263	97.4
28	16/02/2019	01/03/2019	48+160	2.4884	2.4625	99.0
29	16/02/2019	01/03/2019	48+290	2.4884	2.4862	99.9
30	16/02/2019	01/03/2019	48+420	2.4884	2.4474	98.4
31	16/02/2019	01/03/2019	48+550	2.4884	2.4626	99.0
32	18/02/2019	01/03/2019	48+700	2.4956	2.4930	99.9
33	18/02/2019	01/03/2019	48+830	2.4956	2.4617	98.6
34	18/02/2019	01/03/2019	48+960	2.4956	2.4557	98.4
35	19/02/2019	01/03/2019	49+090	2.4956	2.4610	98.6
36	19/02/2019	01/03/2019	49+220	2.4956	2.4410	97.8
37	19/02/2019	01/03/2019	49+350	2.4956	2.4707	99.0
38	19/02/2019	01/03/2019	49+480	2.4956	2.4440	97.9

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

En la figura 17 muestra el comportamiento de la compactación por medio de la extracción de 38 núcleos asfálticos a lo largo del tramo en análisis en una distancia de 130 metros entre cada núcleo.

Figura 12. **Gráfica de compactación de núcleos asfálticos**



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel,

3.3. Comparación de ensayos de compactación de la carpeta asfáltica por el método no destructivo

Al efectuar los ensayos de chequeo de compactación por medio del método no destructivo, se emplea un densímetro electrónico sobre la superficie que se desea evaluar, realizando una lectura sobre la superficie en donde se extrajeron los núcleos, esto a modo de comparar los resultados por ambos métodos, esto de igual manera ayuda a calibrar el equipo no destructivo, los chequeos efectuados por medio de este método se realizaron abarcando el doble de lecturas en el tramo en relación a la cantidad del método destructivo, esto ayuda a obtener una mayor base de datos y resultados más representativos.

Figura 13. Porcentaje de compactación con densímetro electrónico

ID. PRUEBA	ESTACIÓN	FECHA DE COLOCACIÓN	DENSIDAD EN LABORATORIO g/cm ³	Densidad en lbs/pie ³	1.2600	DENSÍMETRO	
						FACTOR	DENSIDAD
1	*44+600	06/02/2019	2.4979	196.4824	1.2600	192.43	97.94
2	44+665					189.63	96.51
3	*44+730					190.20	96.80
4	44+795					190.10	96.75
5	*44+860					189.27	96.33
6	44+925					191.07	97.24
7	*44+990	07/02/2019	2.4961	196.3409	1.2600	193.63	98.62
8	45+055					190.23	96.89
9	*45+120					188.60	96.06
10	45+185					189.97	96.75
11	*45+250					191.87	97.72
12	45+315					191.37	97.47
13	*45+380					194.33	98.98
14	45+445					190.87	97.21
15	*45+580	08/02/2019	2.487	195.6251	1.2600	191.30	97.79
16	45+645					192.37	98.33
17	*45+730					195.13	99.75
18	45+775					189.83	97.04
19	*45+840					189.60	96.92
20	45+905					190.63	97.45
21	*45+970	11/02/2019	2.4985	196.5296	1.2600	191.63	97.51
22	46+035					190.70	97.03
23	*46+100					189.67	96.51
24	46+165					189.97	96.66
25	*46+230					190.77	97.07
26	46+295					191.63	97.51
27	*46+360					190.70	97.03
28	46+375	12/02/2019	2.4973	196.4353	1.2600	191.60	97.54
29	*46+440					191.97	97.73
30	46+505					191.53	97.50
31	*46+570					191.43	97.45
32	46+635					190.63	97.05
33	*46+700					193.96	98.74
34	46+815	13/02/2019	2.4982	196.5060	1.2600	189.63	96.50
35	*46+880					191.10	97.25
36	46+945					191.73	97.57
37	*47+010					195.46	99.47
38	47+075					189.47	96.42
39	*47+140					190.20	96.79

Continuación de la figura 13.

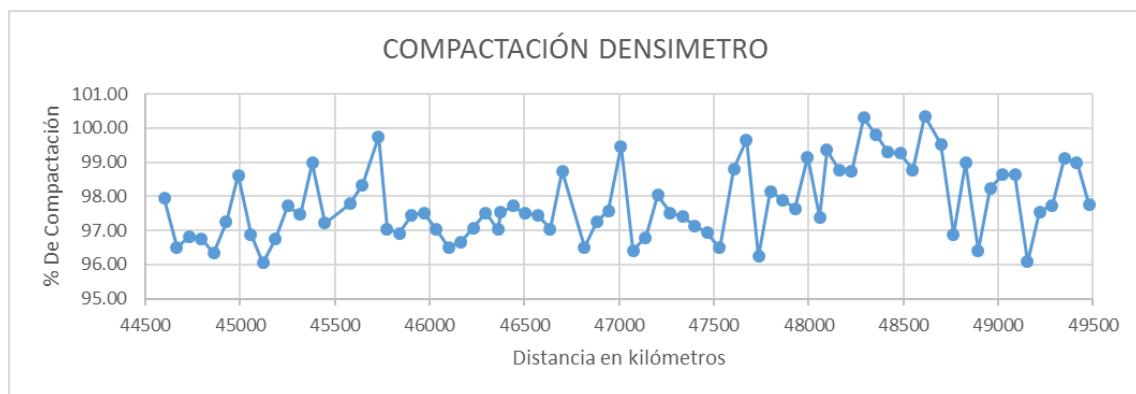
40	47+205	14/02/2019	2.4825	195.2711	1.2600	191.43	98.03
41	*47+270					190.43	97.52
42	47+335					190.20	97.40
43	*47+400					189.67	97.13
44	47+465					189.27	96.93
45	*47+530					188.43	96.50
46	47+605	15/02/2019	2.4915	195.9790	1.2600	193.63	98.80
47	*47+670					195.30	99.65
48	47+735					188.60	96.23
49	*47+800					192.34	98.14
50	47+865					191.87	97.90
51	*47+930					191.37	97.65
52	47+995	16/02/2019	2.4884	195.7352	1.2600	194.33	99.16
53	*48+060					190.87	97.39
54	48+095					194.47	99.35
55	*48+160					193.33	98.77
56	48+225					193.23	98.72
57	*48+290					196.33	100.31
58	48+355	18/02/2019	2.4956	196.3015	1.2600	195.33	99.79
59	*48+420					194.37	99.30
60	48+485					194.30	99.27
61	*48+550					193.33	98.77
62	48+615					197.00	100.36
63	*48+700					195.40	99.54
64	48+765	19/02/2019	2.4956	196.3015	1.2600	190.20	96.89
65	*48+830					194.30	98.98
66	48+895					189.27	96.42
67	*48+960					192.85	98.24
68	49+025					193.63	98.64
69	*49+090					193.63	98.64
70	49+155					188.60	96.08
71	*49+220					191.50	97.55
72	49+285					191.87	97.74
73	*49+350					194.54	99.10
74	49+415					194.33	99.00
75	*49+480					191.93	97.77
*Núcleo de chequeo de espesor y compactación					PROMEDIO	97.23	

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

La figura 18 muestra el comportamiento de la compactación por medio de las lecturas del densímetro electrónico con un total de 75 lecturas a lo largo del

tramo en una distancia promedio de 65 metros entre lecturas, con esto se logra una mayor densidad de datos en el tramo en análisis, ambos métodos chequeados en el tramo de la estación 44+600 hasta la estación 49+480.

Figura 14. **Gráfica de compactación con densímetro electrónico**

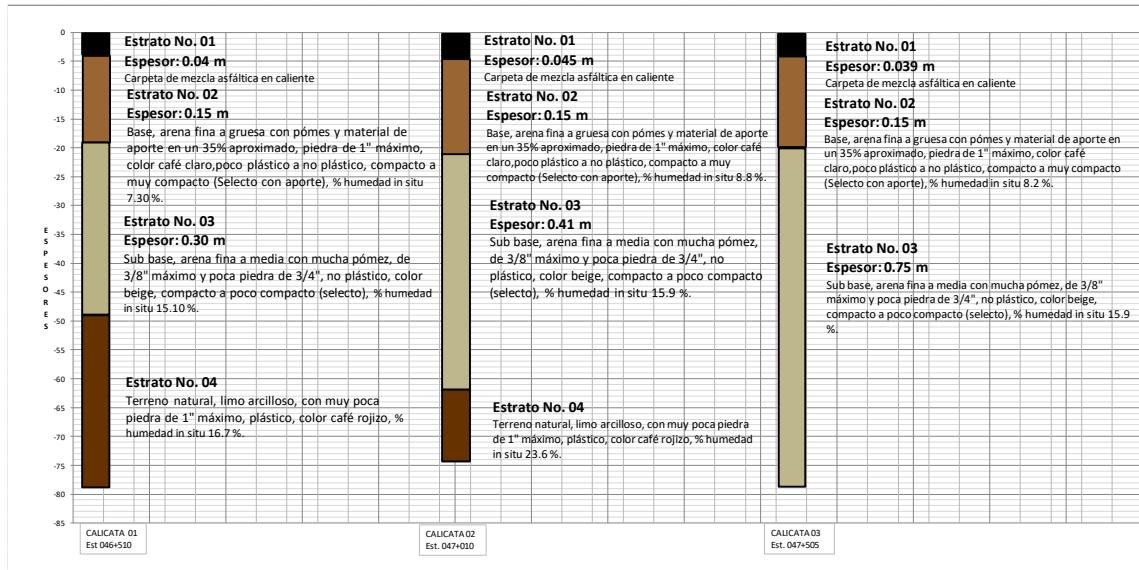


Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

3.4. Mediciones de estratos que componen la estructura del pavimento flexible por el método destructivo

Los resultados de las mediciones se lograron a través de las exploraciones a cielo abierto, midiendo cada estrato por sus características físicas (color, composición granulométrica y humedad), de cada una de las 6 calicatas realizadas.

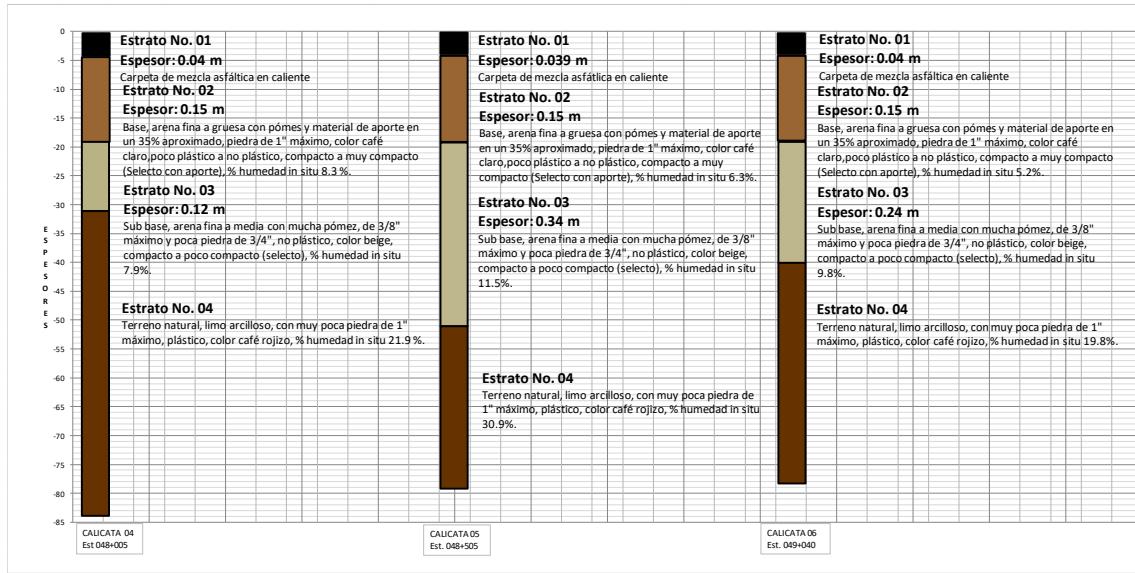
Figura 15. Resultados de mediciones de estratos de calicatas 1, 2 y 3



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Como se puede observar en la figura 21, se registraron las 3 primeras calicatas de las estaciones 046+510, 047+510 y 047+505, en donde se midieron los estratos existentes de cada calicata, siendo estas: la carpeta asfáltica, la base y la sub base.

Figura 16. Resultados de mediciones de estratos de calicatas 4, 5 y 6



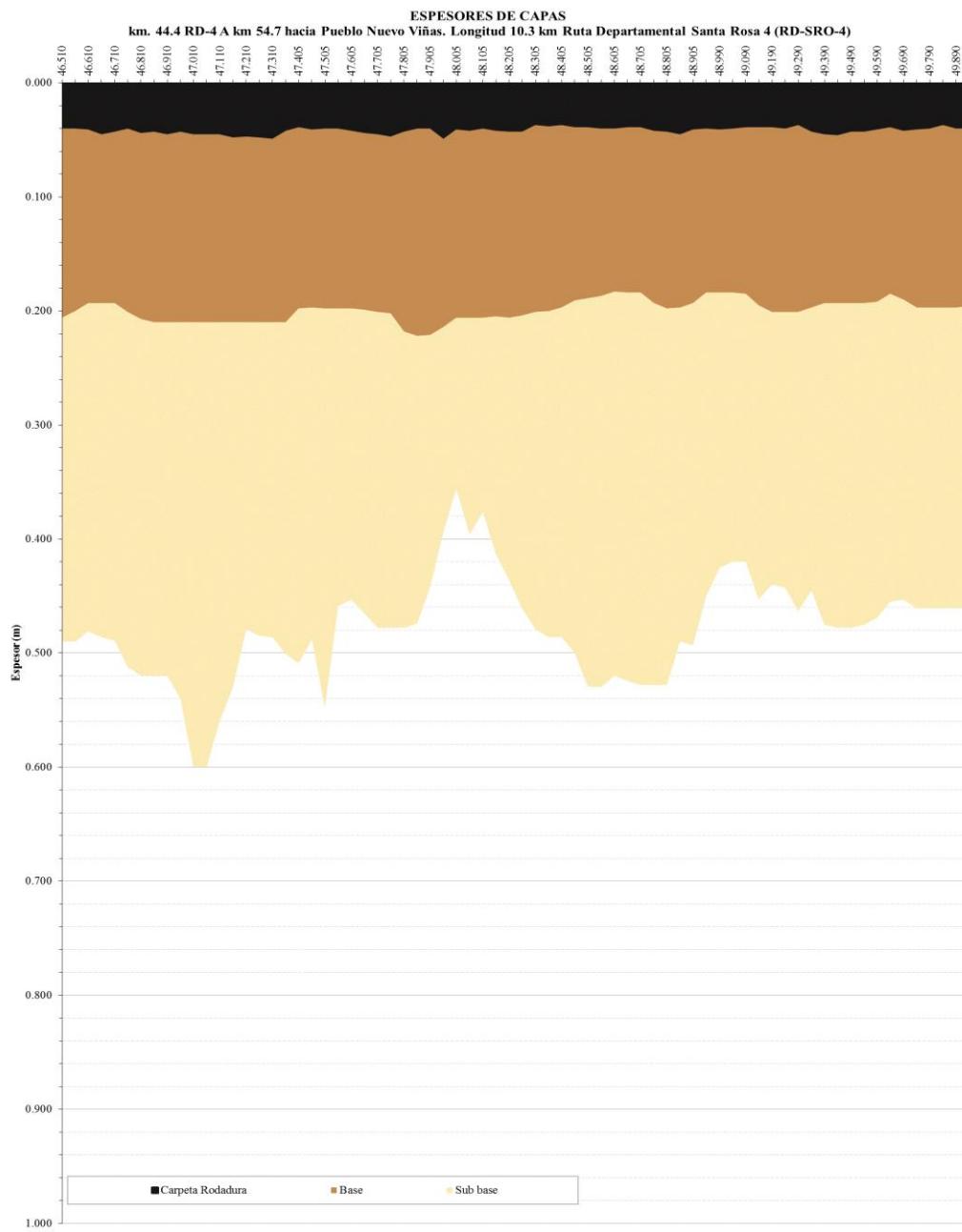
Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

En la figura 22 se observan las capas de carpeta asfáltica, base y sub base, en donde se registraron las últimas 3 calicatas de este estudio, de las estaciones 048+005, 048+505 y 049+040.

3.5. Mediciones de estratos que componen la estructura del pavimento flexible por el método no destructivo

Los resultados de las mediciones de los estratos del pavimento obtenidos por medio del método no destructivo fueron por medio de las lecturas de la antena del georadar el cual se posicionó en la estación 046+500 como punto inicial de lecturas en el tramo hasta llegar a la estación 050+000, logrando 70 lecturas a lo largo del tramo.

Figura 17. Resultado de mediciones por medio del georadar



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Como se puede observar en la figura 23, por medio de las lecturas del georadar se logra la medición continua de los estratos de cada capa que compone la estructura del pavimento, de este modo se puede obtener mayor información por la alta densidad de datos que se pueden obtener a comparación de los métodos destructivos que son puntuales y de una densidad menor a lo largo del tramo en análisis, en la tabla XII se detallan los espesores medidos con el georadar.

Tabla XII. Resultados de mediciones de estratos con georadar

Estación (km)		Espesores (m)		
Inicio	Fin	Carpeta Rodadura	Base	Sub base
46.500	46.510	0.040	0.17	0.28
46.510	46.560	0.040	0.16	0.29
46.560	46.610	0.041	0.15	0.29
46.610	46.660	0.045	0.15	0.29
46.660	46.710	0.043	0.15	0.30
46.710	46.760	0.040	0.16	0.31
46.760	46.810	0.044	0.16	0.31
46.810	46.860	0.043	0.17	0.31
46.860	46.910	0.045	0.17	0.31
46.910	46.960	0.043	0.17	0.33
46.960	47.010	0.045	0.17	0.39
47.010	47.060	0.045	0.17	0.39
47.060	47.110	0.045	0.17	0.35
47.110	47.160	0.048	0.16	0.32
47.160	47.210	0.047	0.16	0.27
47.210	47.260	0.048	0.16	0.28
47.260	47.310	0.049	0.16	0.28
47.310	47.360	0.042	0.17	0.29
47.360	47.405	0.039	0.16	0.31
47.405	47.455	0.041	0.16	0.29

Continuación de la tabla XII.

47.455	47.505	0.040	0.16	0.35
47.505	47.555	0.040	0.16	0.26
47.555	47.605	0.042	0.16	0.26
47.605	47.655	0.044	0.16	0.27
47.655	47.705	0.045	0.16	0.28
47.705	47.755	0.047	0.16	0.28
47.755	47.805	0.043	0.18	0.26
47.805	47.855	0.040	0.18	0.25
47.855	47.905	0.040	0.18	0.22
47.905	47.955	0.049	0.17	0.18
47.955	48.005	0.041	0.17	0.15
48.005	48.055	0.042	0.16	0.19
48.055	48.105	0.040	0.17	0.17
48.105	48.155	0.042	0.16	0.21
48.155	48.205	0.043	0.16	0.23
48.205	48.255	0.043	0.16	0.26
48.255	48.305	0.037	0.16	0.28
48.305	48.355	0.038	0.16	0.29
48.355	48.405	0.037	0.16	0.29
48.405	48.455	0.039	0.15	0.31
48.455	48.505	0.039	0.15	0.34
48.505	48.555	0.040	0.15	0.34
48.555	48.605	0.040	0.14	0.34
48.605	48.655	0.039	0.15	0.34
48.655	48.705	0.039	0.15	0.34

Continuación de la tabla XII.

48.705	48.755	0.042	0.15	0.34
48.755	48.805	0.043	0.16	0.33
48.805	48.855	0.045	0.15	0.29
48.855	48.905	0.041	0.15	0.30
48.905	48.955	0.040	0.14	0.27
48.955	48.990	0.041	0.14	0.24
48.990	49.040	0.040	0.14	0.24
49.040	49.090	0.039	0.15	0.24
49.090	49.140	0.039	0.16	0.26
49.140	49.190	0.039	0.16	0.24
49.190	49.240	0.040	0.16	0.24
49.240	49.290	0.037	0.16	0.26
49.290	49.340	0.043	0.15	0.25
49.340	49.390	0.045	0.15	0.28
49.390	49.440	0.046	0.15	0.29
49.440	49.490	0.043	0.15	0.29
49.490	49.540	0.043	0.15	0.28
49.540	49.590	0.041	0.15	0.28
49.590	49.640	0.039	0.15	0.27
49.640	49.690	0.042	0.15	0.26
49.690	49.740	0.041	0.16	0.26
49.740	49.790	0.040	0.16	0.26
49.790	49.840	0.037	0.16	0.26
49.840	49.890	0.040	0.16	0.26
49.890	49.940	0.040	0.16	0.27

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Comparación de resultados de ensayos con métodos destructivos y métodos no destructivos

De los ensayos realizados se comparan los resultados obtenidos tanto de módulos de resiliencia utilizando los datos de CBR por medio de correlación y el cálculo de módulos, también, por medio de deflexiones medidas y su procesamiento con el método de retrocálculo AASHTO 93; para la comparación de ensayos de compactación se obtuvieron los datos de núcleos extraídos en carpeta asfáltica y con sus características volumétricas se calculó la densidad y grado de compactación en relación a la muestra patrón de laboratorio, el otro método para el chequeo de compactación se realizó por medio de lecturas de densímetro electrónico, el cual tiene la capacidad de determinar la densidad de la mezcla asfáltica por medio de contacto directo con la superficie del pavimento y por último la medición de estratos de las capas de la estructura del pavimento utilizando el método tradicional de calicatas estratigráficas y del mismo modo comparándolo con el método no destructivo del georadar, con el que se logra lecturas de los estratos del pavimento por medio de las frecuencias de los materiales.

4.1.1. Módulo de resiliencia de la subrasante

Con respecto al módulo de resiliencia (MR) de la subrasante, el resultado obtenido por medio del ensayo del valor soporte de California CBR, comparado con el resultado del método de deflexiones por medio del deflectómetro de impacto ligero LWD.

En la tabla XIII se muestra la diferencia de resultados entre el método destructivo, (MR) por CBR y el método no destructivo el (MR) por retrocálculo considerando el ajuste de la desviación estándar, en el que se puede observar la diferencia mayor de 2,216 psi y la diferencia menor es de 1,863, esto siendo los resultados de los tramos homogéneos estimados.

Tabla XIII. Diferencias de módulos de resiliencia MR calculado por ambos métodos

TRAMOS	TRAMOS	CBR	LWD	DIFERENCIAS MR
		MR f(CBR)	MR DISEÑO	
1	506+360 - 517+860	10020	7804	2216.00
2	517+860 - 522+860	10020	8271	1749.00
3	522+860 - 527+610	10020	8157	1863.00

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla XIV. Diferencias de número estructural SN del pavimento en función al MR

TRAMOS	TRAMOS	CBR	LWD	DIFERENCIAS SN
		SN	SN	
1	506+360 - 517+860	4.02	4.37	0.35
2	517+860 - 522+860	4.02	4.29	0.27
3	522+860 - 527+610	4.02	4.31	0.29

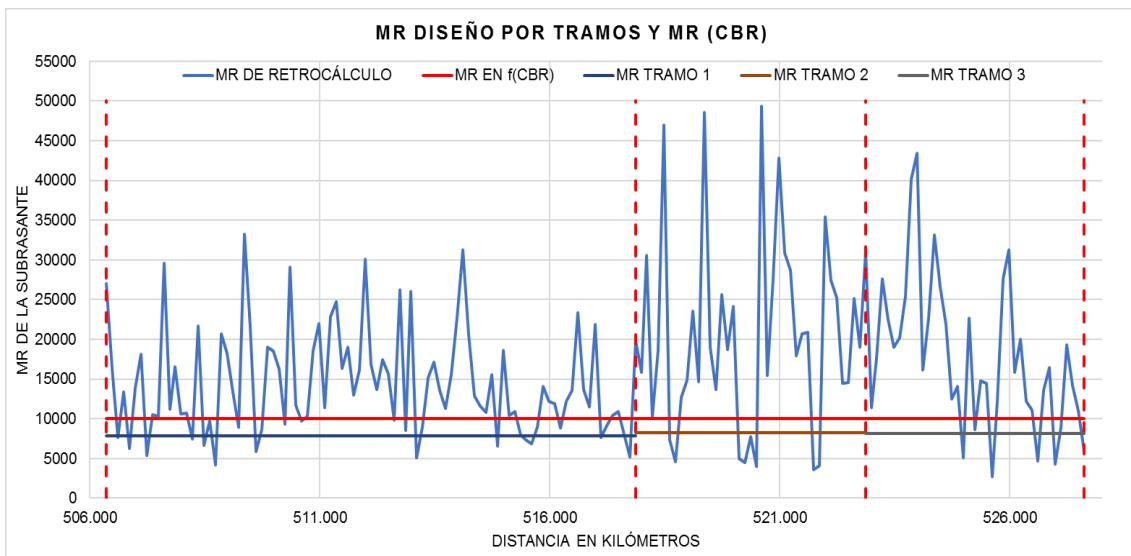
Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

El módulo resiliente de una subrasante es inversamente proporcional al número estructural que soporta, por lo que las diferencias mostradas en la tabla XIV, nos indican un mayor número estructural requerido en los tramos calculados por retrocálculo, para fines de diseño, el diseñador puede tomar estos datos como

factor de seguridad, ya que, el valor de MR calculado con el CBR, es estático y acondicionado, por lo que se corre el riesgo de sub dimensionar la estructura del pavimento y con esto disminuir la confiabilidad tiempo de servicio proyectado.

En la figura 23 se puede observar el ajuste realizado tomando como dato de diseño el MR promedio menos su desviación estándar, siendo este el resultado del MR de diseño, las diferencias son mínimas a comparación del MR promedio calculado.

Figura 18. MR de diseño y MR (CBR)



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

En los resultados obtenidos de este tramo, se puede observar que los MR de diseño por retrocálculo son más conservadores que el MR en función al CBR, a criterio de diseño se toma el MR de diseño de retrocálculo a modo de garantizar el desempeño de la vida útil del pavimento.

4.1.2. Grado de compactación de carpeta asfáltica

En los resultados que se presentaron del chequeo de compactación en la carpeta asfáltica, se puede observar una tendencia similar tanto de la compactación de los núcleos asfálticos como las lecturas del densímetro electrónico, en la tabla XV se puede observar que la máxima diferencia entre ambos métodos de ensayo, así mismo la diferencia mínima.

Tabla XV. Diferencia de compactación entre los métodos destructivos y no destructivos

Estación	% Compactación		Diferencia	Estación	% Compactación		Diferencia
	Densímetro	Núcleo			Densímetro	Núcleo	
*44+600	97.94	97.6	0.34	*47+140	96.79	97.2	-0.43
*44+730	96.80	97.4	-0.60	*47+270	97.52	98.4	-0.88
*44+860	96.33	96.8	-0.47	*47+400	97.13	97.6	-0.50
*44+990	98.62	99.6	-0.98	*47+530	96.50	98.4	-1.92
*45+120	96.06	96.8	-0.74	*47+670	99.65	100.9	-1.22
*45+250	97.72	97.0	0.72	*47+800	98.14	97.9	0.26
*45+380	98.98	100.5	-1.52	*47+930	97.65	98.1	-0.47
*45+580	97.79	97.7	0.05	*48+060	97.39	97.4	-0.03
*45+730	99.75	100.1	-0.40	*48+160	98.77	99.0	-0.19
*45+840	96.92	96.5	0.40	*48+290	100.31	99.9	0.39
*45+970	97.51	97.9	-0.43	*48+420	99.30	98.4	0.95
*46+100	96.51	96.8	-0.29	*48+550	98.77	99.0	-0.19
*46+230	97.07	97.6	-0.55	*48+700	99.54	99.9	-0.36
*46+360	97.03	96.9	0.17	*48+830	98.98	98.6	0.34
*46+440	97.73	97.6	0.17	*48+960	98.24	98.4	-0.16
*46+570	97.45	97.7	-0.25	*49+090	98.64	98.6	0.03
*46+700	98.74	99.1	-0.32	*49+220	97.55	97.8	-0.26
*46+880	97.25	98.6	-1.38	*49+350	99.10	99.0	0.10
*47+010	99.47	100.5	-1.08	*49+480	97.77	97.9	-0.16

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

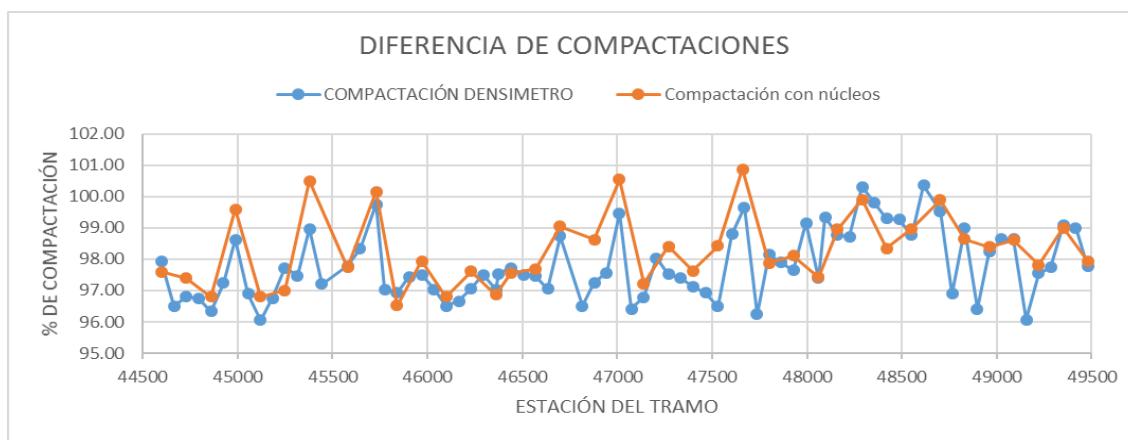
De los resultados de la tabla XV, los valores negativos, en este caso -1.92 % indica que la compactación calculada con el núcleo es mayor que lo calculado con el densímetro, y el valor positivo 0.95% indica que la lectura del densímetro es mayor a lo calculado con el núcleo asfáltico, así mismo se muestran los valores de diferencia mínima entre ambos métodos, siendo estos -0,03 % y 0.03 %, las diferencias en el caso de la estación 47+530 -1.92 %, se debe a que al momento de realizar en ensayo con el densímetro esta se encontraba con presencia de humedad arriba del 2 % lo cual afecta la densidad bruta de la mezcla afectando la lectura, sin embargo la tendencia de lectura es similar al de los núcleos, en el caso de la diferencia del 0.95 %, se debe a que en campo la densidad de la carpeta se toma a una muestra íntegra en cambio el núcleo sufre daño al momento de su manipulación provocando desgranamiento en las orillas más débiles, esto provoca un cambio mínimo en la absorción de agua el cual afecta el peso en el agua y peso con superficie seco saturada, pesos que afectan directamente el cálculo de la densidad de la mezcla, en mayor o menor porcentaje de compactación.

En la figura 23 se muestran las tendencias de las compactaciones, en la línea de color rojo se muestran las compactaciones a lo largo del tramo, a una distancia de 130 metros entre cada núcleo, la línea de color azul muestra la tendencia de la compactación a lo largo del mismo tramo, a una distancia de 65 metros entre cada chequeo, aumentado al doble la densidad de los datos obtenidos.

En la figura 24 se observan los valores del promedio de cada método de medición, en el que el promedio de chequeos realizados por medio de núcleos es mayor en referencia al método por medio de densímetro, sin embargo, aplicando la desviación estándar del promedio del método destructivo el cual nos sirve de referencia, sumándole la desviación estándar al promedio para crear un

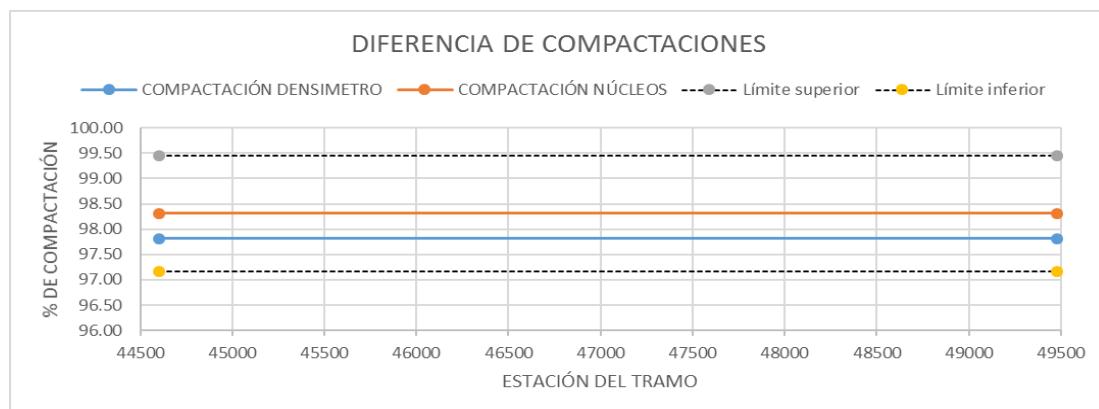
límite de tolerancia superior y al restarle la desviación estándar al promedio, se crea el límite inferior de tolerancia; con este rango de tolerancia creado podemos observar que el promedio del método no destructivo entra dentro de tolerancia además del mínimo aceptado del 97 % de compactación.

Figura 19. Gráfica de comparación de compactaciones



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 20. Promedio de compactaciones



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

4.1.3. Medición de estratos de la estructura del pavimento

De las mediciones realizadas en el tramo, en la tabla XVI se muestra el resumen de las mediciones realizadas por medio de exploraciones a cielo abierto, midiendo así cada estrato, desde la carpeta asfáltica, la capa de base y la capa de sub base.

Tabla XVI. Espesores medidos en calicatas

Calicata	Estación	Espesores (metros)		
		Carpeta Asfáltica	Base	Sub base
1	046+510	0.04	0.15	0.30
2	047+010	0.045	0.15	0.41
3	047+505	0.039	0.15	0.75
4	048+005	0.04	0.15	0.12
5	048+505	0.039	0.15	0.34
6	049+040	0.04	0.15	0.24

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

4.1.3.1. Estrato de carpeta asfáltica

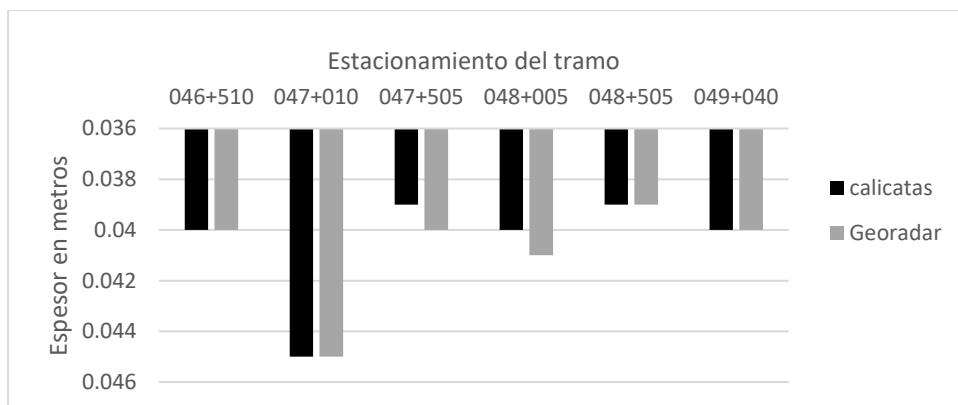
De los resultados obtenidos de las mediciones en las calicatas, se ubica la estación y se compara con las mediciones realizadas con el georadar, esto con el fin de comparar los resultados y registrar sus diferencias, en la tabla XVII se muestran los resultados y en la figura 24 se pueden observar de manera gráfica la medición realizada.

Tabla XVII. Espesores de carpeta asfáltica

Estación	Carpeta Asfáltica (m)		Diferencias (m)
	Calicata	Georadar	
046+510	0.040	0.040	0.000
047+010	0.045	0.045	0.000
047+505	0.039	0.040	0.001
048+005	0.040	0.041	0.001
048+505	0.039	0.039	0.000
049+040	0.040	0.040	0.000

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 21. Espesores de carpeta asfáltica



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

De los resultados obtenidos, en la figura 24 se puede observar que las diferencias entre cada medición son mínimas, por lo que el ensayo no destructivo es muy similar al destructivo por lo que el ensayo por medio del georadar es de una confiable precisión, sin embargo, este ensayo depende directamente de las mediciones de estratos por medio de calicatas ya que con los datos obtenidos en

las mediciones se calibra la medición realizada con las antenas de alta frecuencia, en los siguientes resultados se observarán las diferencias de los estratos inferiores del pavimento.

4.1.3.2. Estrato de base

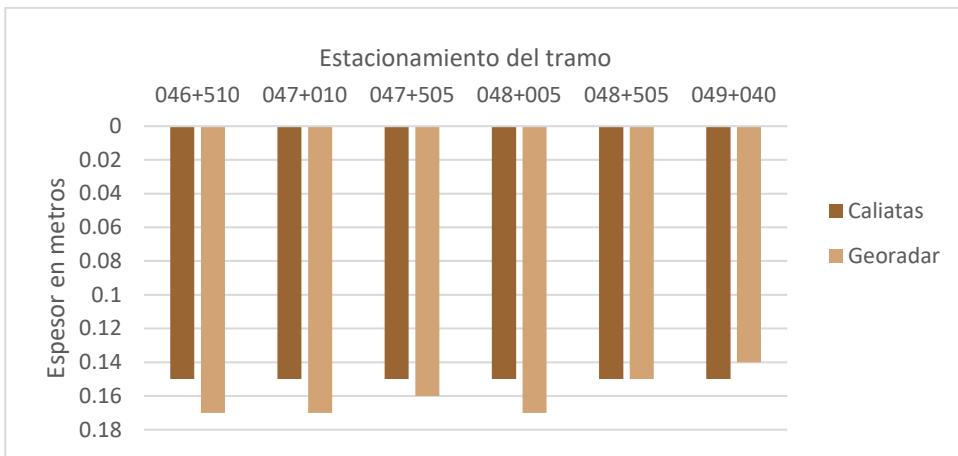
De los datos obtenidos en el estrato de base, los resultados no tuvieron mucha diferencia entre un método y otro, ya que, el procesamiento de datos en el software del georadar se emplean filtros para identificar la secuencia de inicio y fin de cada capa a lo largo del tramo y con esto se logra la identificación del estrato, en la tabla XVIII se muestran los resultados y diferencias entre cada método.

Tabla XVIII. Espesores de base

Estación	Base (m)		Diferencias (m)
	Calicata	Georadar	
046+510	0.15	0.170	0.02
047+010	0.15	0.170	0.02
047+505	0.15	0.160	0.01
048+005	0.15	0.170	0.02
048+505	0.15	0.150	0.00
049+040	0.15	0.140	-0.01

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 22. Espesores de base



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Tal como se puede observar en la figura 25, las mediciones de los estratos con el georadar no varían mucho en relación con la medida realizada en las calicatas, lo que a criterio de evaluación de espesores puede ser tomado como válido, considerado que entre los estratos pueden darse contaminación entre ellos, ya que, por acción capilar del agua, el estrato inferior contamine el estrato superior.

4.1.3.3. Estrato de sub base

En el estrato de la sub base, los resultados fueron similares en ambos métodos, sin embargo, en la estación 047+505 se observa una diferencia muy evidente, esto puede deberse a que, al momento de realizar la calicata, se haya realizado del lado contrario al paso del georadar, ya que en la calicata se muestra una capa de sub base en el que se haya hecho algún tratamiento de bacheo, por lo que el resultado haya tenido una gran diferencia.

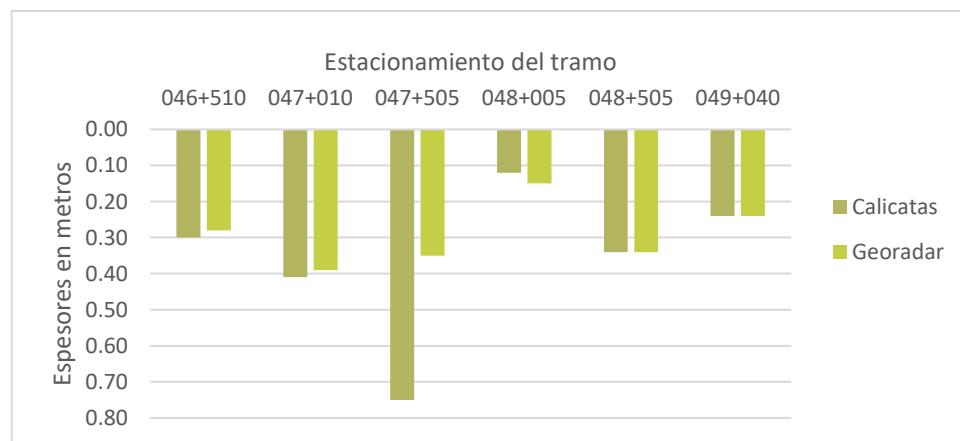
En la tabla XIX se muestran los resultados de la medición realizada al estrato de la sub base, la medida y su diferencia entre cada método de ensayo realizado, en el caso del georadar, con los datos obtenidos se logró identificar la capa de sub base gracias a la aplicación de filtros del software de procesamiento de datos.

Tabla XIX. Espesores de sub base

Estación	Sub base (m)		Diferencias (m)
	Calicata	Georadar	
046+510	0.30	0.280	-0.02
047+010	0.41	0.390	-0.02
047+505	0.75	0.350	-0.40
048+005	0.12	0.150	0.03
048+505	0.34	0.340	0.00
049+040	0.24	0.240	0.00

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 23. Espesores de sub base



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Tal como se muestra en la figura 26, en la estación 047+505, la diferencia entre las mediciones, como se indicó anteriormente, esto puede deberse a que de lado contrario donde se realizó la calicata haya tenido alguna intervención de bacheo en el que se sustituyó el material de subrasante por material de sub base, esto se da comúnmente cuando se estabiliza o sanea algún bache puntual, en cambio, los demás resultados fueron muy similares, siguiendo la tendencia del estrato en la medición de ambos métodos practicados.

4.1.3.4. Costo y eficiencia de cada método

Tanto los resultados y la precisión entre ambos métodos son importantes, debemos tomar en cuenta el costo de cada método que va ligado directamente con su eficiencia, por lo que en las tablas XX, XXI y XXII se muestran los costos en dólares americanos con un valor de cambio de Q. 7.88 por dólar y tiempo de ejecución entre cada método, y la tabla XXIII muestra el dato consolidado de costo y tiempo, del cual se calcula la eficiencia de cada método utilizado, en un tramo de 3 kilómetros.

Tabla XX. Costo de ensayo para el módulo resiliente (MR)

MÓDULO DE RESILIENCIA DE LA SUBRASANTE					
Ensayo	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Total	Tiempo de ejecución (días)
Destruktivo	6	Unidad	\$ 755.08	\$ 4,530.46	18
No destructivo	1	Global*	\$ 2,531.73	\$ 2,531.73	9

*Incluye 25 ensayos con el LWD, 3 Calicatas, 3 muestreos, 3 Proctor, 3 CBR, 3 límites de consistencia y 3 granulometrías.

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla XXI. Costo de ensayo de compactación en carpeta asfáltica

COMPACTACIÓN DE LA CARPETA ASFÁLTICA					
Ensayo	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Total	Tiempo de ejecución (días)
Destructivo	38	Unidad	\$ 126.90	\$ 4,822.34	7
No destructivo	75	Lectura	\$ 15.86	\$ 1,189.72	3

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla XXII. Costo de medición de estratos de la estructura del pavimento asfáltico

MEDICIONES DEL ESTRATO DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO					
Ensayo	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Total	Tiempo de ejecución (días)
Destructivo	6	unidad	\$ 316.26	\$ 1,903.55	4
No destructivo	3	kilómetro	\$ 423.01	\$ 1,269.03	2

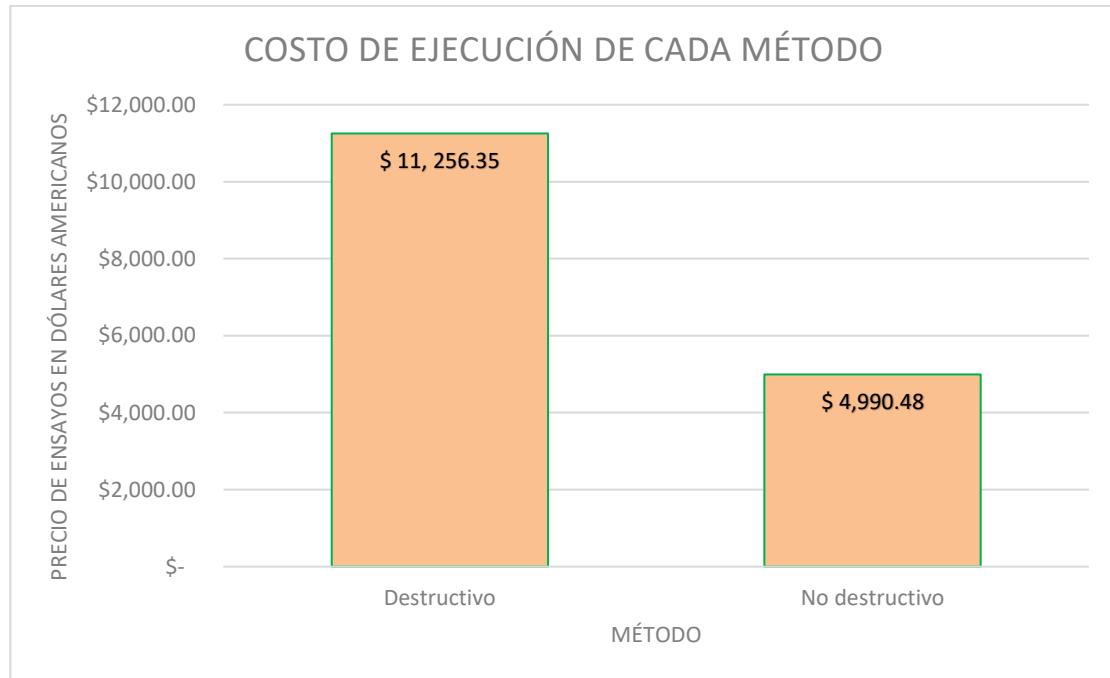
Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla XXIII. Costo consolidado de los ensayos propuestos y su duración de ejecución

CONSOLIDADO DE ENSAYOS		
Ensayo	Costo total	Tiempo de ejecución (días)
Destructivo	\$ 11,256.35	29
No destructivo	\$ 4,990.48	14

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

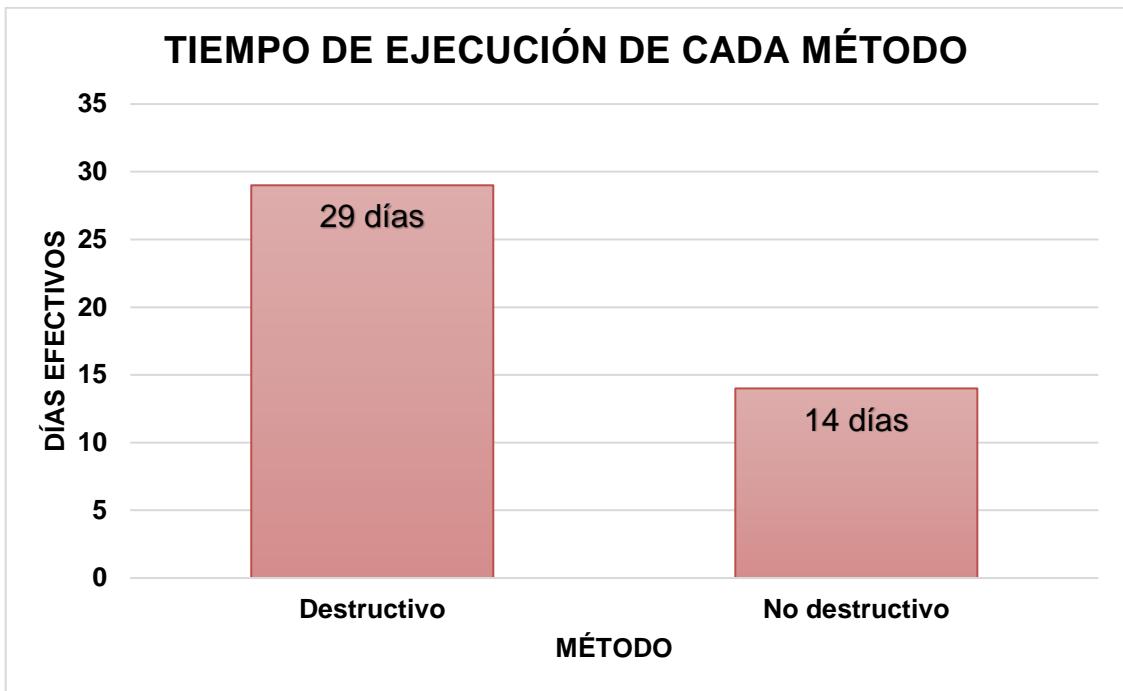
Figura 24. Costo de los ensayos propuestos



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

En la figura 27 se muestra la comparación de los costos entre cada método, el costo de los ensayos no destructivos es 56 % menor en costos en relación al costo del método destructivo, por lo que el método no destructivo es más económico en el costo de un estudio de 3 kilómetros de longitud,

Figura 25. Duración de ejecución de los ensayos propuestos



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

La figura 28 muestra la duración de los ensayos en días de cada método, en el que se observa que el método no destructivo lleva menor tiempo de ejecución en relación al tiempo del método destructivo, se toma como referencia el método no destructivo con una eficiencia del 100 % por la que la eficiencia del método destructivo es del 48 %, lo que se traduce en que el método no destructivo se puede realizar en la mitad del tiempo en comparación del método destructivo.

CONCLUSIONES

1. Las comparaciones entre las dos metodologías de ensayo (destructivos y no destructivos) tienen diferencias considerables, tanto económicas como en tiempo de ejecución, obteniendo así los beneficios del método no destructivo en la disminución de cantidad de ensayos destructivos, lo que se traduce en disminución en tiempo y daños en un 50 % a la integridad de la estructura del pavimento.
2. Las características de los ensayos destructivos consideran los factores como la demanda de tiempo, recurso humano y recursos de equipo de laboratorio en la obtención de muestras y su acondicionamiento según las especificaciones de cada ensayo, dichos factores caracterizan a este método con un alto costo, tardado y agresivo al pavimento, por el lado de los ensayos no destructivos, los factores determinantes en el ensayo es la precisión de los equipos que permiten caracterizar a este método como un método económico y eficiente.
3. El módulo de resiliencia (MR) de la subrasante, es la variable determinante de la propiedad mecánica del suelo, ya que, a mayor módulo de resiliencia menor demanda del número estructural, por lo tanto, la precisión de el cálculo de esta propiedad es de suma importancia, el método no destructivo presenta un menor valor en el módulo por las correcciones y ajustes realizados dependiendo de la característica del material y su condición ambiental, del ensayo destructivo se obtiene el valor del (MR) con el que se calcula por medio de ecuaciones de correlación el valor del CBR, sabiendo que el ensayo se realiza en condiciones controladas

acondicionando la muestra a una compactación y humedad determinada, por lo que el valor del número estructural calculado con el método destructivo, es menor en relación al no destructivo, el ensayo no destructivo asegura un número estructural óptimo que garantiza un mejor desempeño del pavimento evitando el sub dimensionamiento de espesores.

4. Dos ventajas importantes del método no destructivo sobre el destructivo es que, la cantidad de datos obtenidos superan más del doble que los datos del método destructivo, la otra ventaja es la frecuencia de ensayos, el método no destructivo tiene una mayor densidad de ensayos de los cuales hace posible la disminución de la cantidad de ensayos destructivos a un 50 %, lo que es directamente proporcional a disminución de costos, tiempo y daños.

RECOMENDACIONES

1. Utilizar la metodología de ensayos no destructivos en el control de calidad de proyectos viales, ya que, aporta un mejor detalle de información a través de los resultados obtenidos.
2. Realizar ensayos destructivos con el fin de calibrar y ajustar los ensayos no destructivos y de este modo garantizar una mejor precisión en los resultados obtenidos.
3. Implementar en las especificaciones locales la realización de ensayos no destructivos cumpliendo con las dimensiones mínimas a modo de tener un mejor detalle de los estudios o diseños a realizar, sin embargo, estos ensayos deben ser complementados con ensayos destructivos con una menor densidad de ensayos para disminuir los daños que pueden provocar al pavimento existente en caso de control de calidad.
4. Evaluar el análisis de los resultados obtenidos a través de ensayos no destructivos, por medio de ensayos destructivos en los resultados que presenten una anomalía o tenga una varianza muy alta, esto para poder descartar errores o proponer una intervención especial en un tramo homogéneo.

REFERENCIAS

1. AASHTO (1993). *Standard Specifications for transportation Materials and Method of Sampling and Testing.* 23 edition USA. American Association of State Highway and Transportation.
2. AASHTO (2003). *Guide for Design of Pavement Structures.* USA. American Association of State Highway and Transportation.
3. Aguilar, A. (2016). *Inspección de Pavimentos con el Georadar.* XIII Encuentro Participación de la Mujer en la Ciencia, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Guanajuato, México.
4. Alarcón atahuachi, A. (2014). *Manual de Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección de Suelos y Pavimentos.* Maestría en Ingeniería Civil, Universidad Andina “Nestor Caceres Velasquez”, Perú.
5. Albarracín, F., Ávila, E., Bojorque, J. (2015). Evaluación de Pavimentos en Base a Métodos No Destructivos y análisis inverso. *MASKANA*, Volumen (6),152. Doi. Recuperado de <https://doi.org/10.18537/mskn.06.01.11>

6. Balarezo Zapata, J. I. (2017). *Evaluación Estructural Usando Viga Benkelman Aplicada a un Pavimento*. (Trabajo de grado, Universidad De Piura). Recuperado de https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/3135/ICI_241.pdf?sequence=1&isAllowed=y
7. DYNATEST (2020). *Deflectómetro de Impacto (FWD)*. Recuperado de <https://web.dynatest.com/deflectometro-de-impacto-fwd/>
8. Guzmán Suárez, E. A. (2009). *Evaluación Estructural de Pavimentos Flexibles a Partir de Información Tomada con el Deflectómetro de Impacto*. XVII Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.
9. Lukanen, E.O. (1992). *Pavement performance prediction models*. Minnesota: Department of Transportation. Publisher: Braun Intertec Pavement, 121 p.
10. Montejo, A (2002). *Ingeniería de pavimentos para carreteras*. Segunda reimpresión de la segunda edición. Universidad Católica de Colombia Ediciones y publicaciones. Colombia.
11. Murrillo Feo, C.A., Bejarano Urrego L.E. (2013). *Correlation between deflections measurements on flexible pavements obtained under static and dynamic load techniques*. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, p. 393-398. Recuperado de http://www.cfms-sols.org/sites/all/lic/pages/download_pdf.php?file=393-398.pdf.

12. Secretaría de Integración Económica Centroamericana SIECA, *Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos*.
13. Tavira Díaz, J. (s.f.). *Cálculo Mecánico de Pavimentos a Partir de Ensayos No Destructivos*. (Tesis de maestría, Universidad De Sevilla). Recuperado de http://bibing.us.es/proyectos/abreproj/70601/fichero/trabajo_fin_maestro_completo.pdf
14. Ulloa, A. (2011). Guía de Pruebas de Laboratorio y Muestreo en Campo Para Verificación de Calidad en Materiales de un Pavimento Asfáltico. *DIALNET*, Volumen (1),48. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6240953>
15. Uribe Olivares, R. (2015). *Densímetro no nuclear*. Curso Laboratorista Vial “A”. Laboratorio Nacional de Vialidad. Chile.