



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**ESTABILIZACIÓN MECÁNICA DE SUELOS TIPO C-1 PARA SUBBASES Y BASES
UTILIZANDO CEMENTO, CAL HIDRATADA Y CONCRETO ASFÁLTICO RECICLADO**

Kevin David Pinto Enriquez

Asesorado por el Ing. Omar Enrique Medrano Méndez

Guatemala, abril de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTABILIZACIÓN MECÁNICA DE SUELOS TIPO C-1 PARA SUBBASES Y BASES
UTILIZANDO CEMENTO, CAL HIDRATADA Y CONCRETO ASFÁLTICO RECICLADO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

KEVIN DAVID PINTO ENRIQUEZ

ASESORADO POR EL ING. OMAR ENRIQUE MEDRANO MÉNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, ABRIL DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

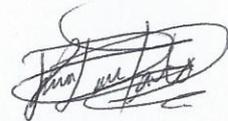
DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Crecencio Benjamín Cifuentes Velásquez
EXAMINADOR	Ing. Andy Williams Alonzo Vásquez
EXAMINADOR	Ing. Dario Francisco Lucas Mazariegos
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

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:

**ESTABILIZACIÓN MECÁNICA DE SUELOS TIPO C-1 PARA SUBBASES Y BASES
UTILIZANDO CEMENTO, CAL HIDRATADA Y CONCRETO ASFÁLTICO RECICLADO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil,
con fecha 2 de noviembre de 2016.



Kevin David Pinto Enriquez



Guatemala, 29 de enero 2018

Ingeniero
José Gabriel Ordóñez Morales
Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería

Ingeniero Ordóñez Morales.

Le saludo cordialmente, el motivo de la presente es para informarle que el trabajo de graduación **“ESTABILIZACIÓN MECÁNICA DE SUELOS TIPO C-1 PARA SUB-BASES Y BASES UTILIZANDO CEMENTO, CAL HIDRATADA Y CONCRETO ASFÁLTICO RECICLADO”**, elaborado por el estudiante de ingeniería civil Kevin David Pinto Enríquez, ha sido finalizado a satisfacción y revisado por mi persona.

Sin otro particular,

Atentamente

“Id y Enseñad a Todos”

Omar Enrique Medrano Méndez
Ingeniero Civil
Colegiado No. 6842

Omar E. Medrano Méndez
Ing. Civil Omar Enrique Medrano Méndez

Colegiado 6842

Jefe de Sección Mecánica de Suelos



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Guatemala,
19 de marzo de 2018

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

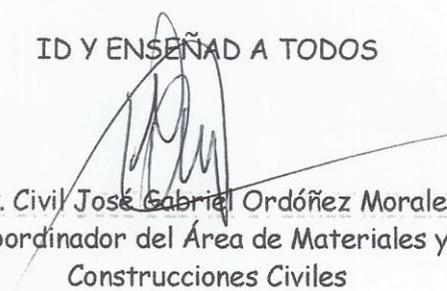
Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **ESTABILIZACIÓN MECÁNICA DE SUELOS TIPO C-1 PARA SUB-BASES Y BASES UTILIZANDO CEMENTO, CAL HIDRATADA Y CONCRETO ASFÁLTICO RECICLADO** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Kevin David Pinto Enriquez quien contó con la asesoría del Ing. Omar Enrique Medrano Méndez.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Civil José Gabriel Ordóñez Morales
Coordinador del Área de Materiales y
Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/mrrm.

Mas de 137 años de Trabajo y Mejora Continua





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Omar Enrique Medrano Méndez y Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación del estudiante Kevin David Pinto Enriquez ESTABILIZACIÓN MECÁNICA DE SUELOS TIPO C-1 PARA SUBBASES Y BASES UTILIZANDO CEMENTO, CAL HIDRATADA Y CONCRETO ASFÁLTICO RECICLADO da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, abril 2018

/mmm.

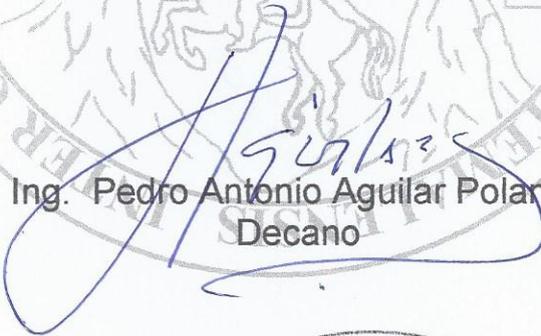
Mas de 137 años de Trabajo y Mejora Continua





El Decano 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 Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **ESTABILIZACIÓN MECÁNICA DE SUELOS TIPO C-1 PARA SUBBASES Y BASES UTILIZANDO CEMENTO, CAL HIDRATADA Y CONCRETO ASFÁLTICO RECICLADO**, presentado por el estudiante universitario: **Kevin David Pinto Enriquez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, abril de 2018



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	“Todo lo puedo en cristo que me fortalece”. Filipenses 4:13
Mis padres	Jorge Pinto y Olimpia Aurora. Mi mayor orgullo es ser su hijo.
Mis hermanos	Marvin Omar, Jorge Arnoldo y Miguel Eduardo. Por todos sus buenos consejos y apoyo.
Mis sobrinas	Andrea Sophia, Ximena Abigail y Kimberly Scarlett. Por ser esos pedazos de cielo que Dios nos regaló.
Mis abuelitos	Alicia, Jorge y María, que descansen en paz. Por siempre apoyarme y guiarme por un buen camino.
Mi familia	Gracias por brindarme su apoyo incondicional y siempre apoyarme
Mis guardianes	Gracias por todas las desveladas, gritos, pruebas e incursiones que hemos vivido. ¡Que nuestra luz nunca se apague!

Mis amigos

Por todos los buenos y malos momentos que vivimos.

Mis primos

Por su aprecio y afecto.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por darme sabiduría, fe y bendiciones en todo momento de mi vida. Porque todo lo puedo en Cristo que me fortalece.
Mis padres	Son los mejores, sin su apoyo incondicional, de ningún modo hubiese conseguido esta meta.
Mi familia	Por ser esos amigos que Dios eligió por mí, pero si él me dejara escoger, los elegiría otra vez.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Mi querida <i>alma mater</i> , por haberme dado la oportunidad de penetrar en el increíble mundo del saber.
Facultad de Ingeniería	Por ser ese lugar tan especial, donde se gana algo más que conocimiento: sabiduría.
Ing. Omar Medrano	Por su valiosa asesoría y consejos en diversas etapas de mi carrera.
Ing. José Istupe	Por compartir sus conocimientos, y brindarme apoyo para realizar el presente trabajo.
Byron García	Por ser una persona generosa que siempre estuvo dispuesto a brindarme su apoyo.

**Departamento de
matemática**

Por brindarme la oportunidad trabajar con personas que no solo son compañeros, sino también amigos.

Dra. Mayra Castillo

Por el apoyo brindado en el inicio de mi carrera profesional, además de sus valiosos consejos académicos.

Inga. Vera Marroquín

Por todos sus consejos y el apoyo brindado durante estos años.

Ing. Arturo Samayoa

Por darme la oportunidad de cumplir el sueño de ser auxiliar de mi querida Facultad.

Mis amigos

Todas esas personas especiales que conocí en la facultad, departamento y el universo, aunque no nombre a cada uno, ustedes saben que tienen un lugar en mi mente y en mi corazón.

Asfalgua

Por el apoyo brindado para la elaboración del análisis experimental del presente trabajo.

Lic. Sonia Miranda

Por el apoyo brindado y el compromiso tan generoso para realizar el presente trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación	3
1.3. Planteamiento del problema	3
1.4. Mantenimiento de carreteras de concreto asfáltico	4
1.4.1. Tipos de mantenimiento	5
1.4.2. Equipo utilizado	6
1.4.3. Maquinaria utilizada.....	8
1.4.4. Materiales utilizados en el mantenimiento	10
1.4.5. Mantenimiento y reconformación de carpeta asfáltica	12
1.4.6. Reconstrucción total de carreteras o método tradicional	13
1.4.7. Impacto ambiental generado	14
1.4.7.1. Consecuencias del mantenimiento	14
1.4.7.2. Medidas de mitigación	15

2.	SITUACIÓN ACTUAL DE LAS CARRETERAS EN GUATEMALA	17
2.1.	Clasificación de las carreteras	17
2.1.1.	Rutas centroamericanas (CA)	17
2.1.2.	Rutas nacionales (RN)	17
2.1.3.	Rutas departamentales (RD).....	18
2.1.4.	Caminos rurales (CR).....	18
2.2.	Estado de las rutas en el país	19
2.2.1.	Rutas en mantenimiento pavimentadas	20
2.2.2.	Rutas en mantenimiento de terracería	23
2.2.3.	Rutas de terracería pendientes de programación por presupuesto	23
2.2.4.	Rutas registradas oficialmente	24
2.2.5.	Proyectos de mantenimiento vial 2017.....	25
2.2.6.	Puntos de control de carga por vehículo	26
2.3.	Kilómetros de carreteras construidas de pavimento flexible	30
2.3.1.	Estimación de kilómetros en mal estado	31
2.4.	Causas del deterioro	32
2.4.1.	Drenaje deficiente	32
2.4.2.	Diseño deficiente.....	33
2.4.3.	Método constructivo inadecuado.....	34
2.4.4.	Condiciones ambientales	37
2.4.5.	Sobrecarga de tránsito	38
2.5.	Consecuencias del deterioro en pavimentos asfálticos.....	38
2.5.1.	Infiltración	39
2.5.2.	Deformaciones	39
2.5.3.	Ahuellamiento.....	40
2.5.4.	Desprendimiento	41
2.5.5.	Fisuración.....	42
2.5.6.	Bache	43

2.5.7.	Hundimiento.....	43
2.5.8.	Hinchamiento.....	43
3.	CARACTERIZACIÓN DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES.....	45
3.1.	Elementos constituyentes del pavimento flexible	45
3.1.1.	Subrasante	46
3.1.2.	Subbase	47
3.1.3.	Base	47
3.1.4.	Carpeta de rodadura.....	47
3.2.	Especificaciones.....	48
3.2.1.	Especificaciones de la subrasante.....	48
3.2.2.	Especificaciones de la subbase.....	49
3.2.3.	Especificaciones de la base.....	50
3.2.4.	Especificaciones de la carpeta de rodadura	51
3.3.	Ensayos de evaluación <i>in situ</i>	54
3.3.1.	Humedad de campo	54
3.3.2.	Calicatas.....	54
3.3.3.	Deflectómetro	55
3.4.	Ensayos de laboratorio	55
3.4.1.	Límites de Atterberg	56
3.4.2.	Granulometría.....	57
3.4.3.	Compactación Proctor	58
3.4.4.	California bearing ratio (CBR).....	60
4.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	61
4.1.	Materiales: agentes estabilizadores	62
4.1.1.	Cemento hidráulico.....	62
4.1.2.	Cal hidratada	62
4.1.3.	Concreto asfáltico reciclado.....	62

4.1.4.	Emulsión asfáltica catiónica de rótula lenta.....	63
4.2.	Equipo de laboratorio	63
4.3.	Ensayos de clasificación del suelo	66
4.3.1.	Límites de Atterberg	66
4.3.2.	Granulometría	67
4.4.	Ensayos de propiedades mecánicas del suelo	69
4.4.1.	Compactación Proctor	69
4.4.2.	Prueba estándar para California bearing ratio.....	70
4.5.	Dosificación con cemento hidráulico, cal hidratada, concreto asfáltico reciclado y emulsión asfáltica.....	72
4.6.	Datos obtenidos	73
4.7.	Cuadro de resultados	80
5.	ANALISIS DE RESULTADOS.....	81
5.1.	Comparación de resultados	81
5.2.	Interpretación de resultados.....	84
5.3.	Comparación económica con otros métodos	85
	CONCLUSIONES.....	89
	RECOMENDACIONES	91
	BIBLIOGRAFÍA.....	93
	ANEXOS.....	97

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Fresadora.....	7
2.	Tren típico de tren reciclador.....	8
3.	Recicladora Wirtgen WR 2000	9
4.	Método tradicional de reparación de carreteras	10
5.	Configuración de sellos	10
6.	Método tradicional de reparación de carreteras	13
7.	Estación de control: Puerto Barrios.....	27
8.	Estación de control: Escuintla	28
9.	Estación de control: Puerto Quetzal.....	28
10.	Estación de control: San Marcos.....	29
11.	Estación de control con báscula móvil	29
12.	Adición de aditivos.....	34
13.	Medidor de humedad tipo “speedy”.....	35
14.	Adición de aditivos.....	36
15.	Deformaciones en el pavimento	40
16.	Transferencia de carga a través del pavimento	45
17.	Estructura típica del pavimento flexible	46
18.	Límites de Atterberg.....	57
19.	Compactación de suelos según su contenido de humedad	59
20.	Comparación gráfica del análisis granulométrico	68
21.	Comparación gráfica densidad seca-humedad	70
22.	Comparación % de CBR - % de compactación.....	71
23.	Dosificación de una muestra de suelo con agentes estabilizadores	73

24.	Comparación gráfica densidad seca-humedad, estabilización número 1.....	74
25.	Comparación % de CBR - % de compactación, estabilización número 1.....	75
26.	Comparación gráfica densidad seca-humedad, estabilización número 2.....	76
27.	Comparación % de CBR - % de compactación, estabilización número 2.....	77
28.	Comparación gráfica densidad seca-humedad, estabilización número 3.....	78
29.	Comparación % de CBR - % de compactación, estabilización número 3.....	79
30.	Comparación de % CBR.....	80
31.	Análisis gráfico para dosificación mínima	82
32.	Cuarteo de la muestra ensayada	97
33.	Dosificación por peso de una muestra de suelo estabilizada	98
34.	Equipo de laboratorio para ensayo de análisis granulométrico.....	99
35.	Equipo de laboratorio para ensayo de compactación Proctor.....	100
36.	Ficha técnica: emulsión asfáltica catiónica de rótula lenta.....	101
37.	Resultados del ensayo de límites de Atterberg.....	102
38.	Resultados del ensayo de granulometría.....	103
39.	Resultados del ensayo de compactación, suelo inalterado	104
40.	Resultados del ensayo de CBR suelo inalterado	105
41.	Resultados del ensayo de compactación, estabilización núm. 1	106
42.	Resultados del ensayo de CBR estabilización núm. 1.....	107
43.	Resultados del ensayo de compactación, estabilización núm. 2	108
44.	Resultados del ensayo de CBR estabilización núm. 2.....	109
45.	Resultados del ensayo de compactación, estabilización núm. 3	110
46.	Resultados del ensayo de CBR estabilización núm. 3.....	111

TABLAS

I.	Clasificación por medio del IRI	20
II.	Resultados del IRI en el país	21
III.	Clasificación según su textura.....	21
IV.	Resultados del IRI en el país	22
V.	Rutas oficialmente registradas en el país.....	24
VI.	Red vial en mantenimiento	25
VII.	Carreteras de acuerdo con su carpeta de rodadura.....	30
VIII.	Carreteras de acuerdo con su tipo de pavimento.....	30
IX.	Rutas de acuerdo con su carpeta de rodadura	31
X.	Estimación de kilómetros en mantenimiento para carreteras de pavimento flexible	32
XI.	Clasificación de suelos de acuerdo con su capacidad de drenaje	33
XII.	Especificaciones para capa de subbase	49
XIII.	Tipos de graduación para suelos de base o subbase	50
XIV.	Especificaciones para capa de base o subbase	51
XV.	Especificaciones para material bituminoso: cemento.....	52
XVI.	Especificaciones para material bituminoso: emulsiones	52
XVII.	Especificaciones para material bituminoso: cemento.....	53
XVIII.	Especificaciones para capa de base o subbase	58
XIX.	Resultados de los límites de Atterberg.....	66
XX.	Resultados del análisis granulométrico	67
XXI.	Especificaciones para capa de base o subbase	68
XXII.	Resultados del ensayo de compactación Proctor	69
XXIII.	Resultados del ensayo de CBR	71
XXIV.	Dosificaciones con agentes estabilizadores.....	72
XXV.	Resultados del ensayo de compactación Proctor, estabilización número 1.....	74

XXVI.	Resultados del ensayo de CBR - estabilización número 1	75
XXVII.	Resultados del ensayo de compactación Proctor, estabilización número 2.....	76
XXVIII.	Resultados del ensayo de CBR - estabilización número 2	77
XXIX.	Resultados del ensayo de compactación Proctor, estabilización número 3.....	78
XXX.	Resultados del ensayo de CBR - estabilización número 3	79
XXXI.	Comparación de resultados para CBR	80
XXXII.	Comparación de resultados	81
XXXIII.	Dosificación mínima para resistencia equivalente al suelo inalterado ..	83
XXXIV.	Datos de materiales para análisis económico.....	85
XXXV.	Cálculo proporcional de dosificación.....	86
XXXVI.	Cálculo de materiales para dosificación.....	87

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
AC	<i>Asphalt cement</i>
CBR	California Bearing Ratio
CR	Camino rural
cm	Centímetro
g	Gramo
IRI	Índice de rugosidad internacional
Kg	Kilogramo
Km	Kilómetro
Lb	Libra
Lbf	Libra fuerza
psi	Libras sobre pulgada cuadrada
m	Metro
μm	Micrómetro
ft	Pie
plg	Pulgadas
RAP	<i>Recycled asphalt concrete</i>
CA	Ruta centroamericana
RD	Ruta departamental
RN	Ruta nacional

GLOSARIO

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials, en español, Asociación Americana de Autoridades Estatales de Carreteras y Transporte.
Acarreo	Transporte de materiales, a cualquier distancia que exceda los 1 000 metros.
Acarreo libre	Transporte de materiales, a una distancia menor o igual a los 1 000 metros.
Ahuellamiento	Fenómeno exteriorizado en los pavimentos flexibles, en el cual se presenta un deterioro superficial de la carpeta de rodadura.
Alicato	Compuesto químico existente en el cemento portland. Reacciona muy rápido al entrar en contacto con el agua.
Análoga	Que tiene analogía o similitud con algo.
ASTM	American Society for Testing Materials, en español, Asociación Americana para el Ensayo de Materiales.

Auscultación	Procedimiento por el cual se evalúa en qué condiciones se encuentra una infraestructura.
COVIAL	Unidad Ejecutora de Conservación Vial, es una dependencia del Ministerio de Comunicación, Infraestructura y Vivienda.
Derecho de vía	Área de terreno que el Estado suministra para ser usada en la construcción de la carreteras, trabajos complementarios y futuras ampliaciones.
Estaciones de control	Puntos estratégicos ubicados sobre la red vial del país para regular la carga vehicular, haciendo uso de básculas fijas y equipo de báscula móvil.
Emulsión	Dispersión fina, más o menos estabilizada de un líquido en otro, los cuales son no miscibles entre sí y están unidos por un emulsificante, emulsionante o emulgente
Escarificación	Acción de remover las capas superiores de una estructura, exponiendo sus capas inferiores.
Floculación	Proceso químico mediante el cual, se aglutinan las sustancias coloidales presentes en el agua. Para realizarse es necesario un floculante.
Fluencia	Estado de deformación irrecuperable en un material.

Fresado	Cortar material mediante una herramienta rotativa.
Gradiente	Variación de aumento o disminución, de una propiedad en un elemento determinado.
Hidrofobicidad	Estado químico en el cual la molécula en cuestión no es capaz de interaccionar con las moléculas de agua, ni por interacciones ion-dipolo ni mediante puentes de hidrógeno.
Infraestructura	Conjunto de medios técnicos, servicios e instalaciones necesarias para el desarrollo de una actividad.
Inherente	Que por su naturaleza está de tal manera unido a algo, que no se puede separar de ello.
IRI	International Roughness Index, en español el Índice Internacional de Rugosidad.
Litoral	Área de transición entre los sistemas terrestres y marinos.
Paulatino	Que se produce o se realiza de forma lenta y gradual.
POA	Plan Operativo Anual.
Postulado	Principio que se admite como cierto sin necesidad de ser demostrado y que sirve como base para otros razonamientos.

Servicialidad	Acción de servir con cuidado, diligencia y obsequio.
Silicato	Minera compuesto por silicio y oxígeno. Es del grupo de los minerales de mayor abundancia en la corteza terrestre.
Transitabilidad	Posibilidad de trasladarse de un lugar a otro a lo largo de las diversas vías públicas.
Volatilidad	Medida de la frecuencia e intensidad de los cambios del precio de un activo en el mercado financiero.

RESUMEN

En el presente trabajo de graduación se describe el comportamiento físico-mecánico de un suelo tipo C-1, estabilizado con cuatro materiales: cemento, cal hidratada, concreto asfáltico reciclado y emulsión asfáltica en diferentes dosificaciones. Propone un método de mejoramiento de suelo, que cumpla con las especificaciones nacionales para ser usado como base o sub-base. Ídem, se describen las proporciones utilizadas durante el desarrollo experimental, por medio de ensayos que permitían estimar el comportamiento mecánico del suelo al ser incorporado a la estructura del pavimento.

Se comparte los valores de capacidad de soporte “California” del suelo, obtenidos durante el desarrollo experimental para las diversas dosificaciones, así como el análisis e interpretación de los ensayos de laboratorio practicados a las estabilizaciones mecánicas de suelo.

OBJETIVOS

General

Estudiar el comportamiento físico-mecánico de un suelo tipo C-1; al incluirle material reciclado con diferentes dosificaciones de cemento y cal hidratada.

Específicos

1. Verificar la capacidad de valor soporte del suelo y compararlo con las especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes de la Dirección General de Caminos conforme a la sección 304.03.
2. Analizar la variación de las características físicas y las propiedades mecánicas del suelo tipo C-1, que han sido estabilizado con cemento, cal hidratada y concreto asfáltico reciclado.
3. Determinar las proporciones que mejor costo/beneficio nos brindan los suelos estabilizados con cemento, cal hidratada y concreto asfáltico reciclado.
4. Comprobar si el rango de proporciones, de cemento, cal hidratada y concreto asfáltico reciclado, utilizadas es eficiente estructuralmente.
5. Comparar si económicamente el método de estabilización con material reciclado es beneficioso con respecto al método tradicional.

INTRODUCCIÓN

El trabajo de graduación tiene por objetivo proponer una solución a la mala disposición de desperdicios. Esto se debe a que, al momento de ejecutar las reparaciones de carreteras en el país, la estructura del pavimento dañada no es depositada en un lugar adecuado.

En consecuencia, se plantea el método de estabilización mecánica de suelos tipo C-1, empleados en bases y subbases, incluyendo dicho material reciclado con diferentes dosificaciones de cemento y cal hidratada.

El desarrollo experimental se realizó mediante ensayos de laboratorio, los cuales permitieron establecer las características físicas y propiedades mecánicas del suelo estabilizado mediante método anteriormente mencionado. Esto se efectuó utilizando la metodología de las normas ASTM y AASHTO.

La finalidad de la investigación es comprobar si el material que, generalmente, se desperdicia puede ser reutilizado en la estructura del pavimento. De esta manera se reduce el impacto generado en el medio ambiente. Se verifica la capacidad de valor soporte del suelo estabilizado, se analiza de manera cuantitativa su viabilidad técnica, según las especificaciones vigentes en este país, determinando si es factible su financiamiento.

1. GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

En las últimas décadas, a través de mucho esfuerzo científico y tecnológico, la Ingeniería Civil ha tenido un gran desarrollo en todas sus ramas, debido a que las especificaciones de construcción son cada día más exigentes. Por esta razón, se han desarrollado materiales para la construcción de carreteras con mayor durabilidad, alta hidrofobicidad, mínimas deformaciones plásticas, etc. Estos requerimientos exigen una mayor resistencia a todos los materiales que componen la estructura del pavimento, dando como resultado las investigaciones en las cuales se han desarrollado nuevos materiales asfálticos, e ingeniosas formas de reutilizar el concreto asfáltico.

Un primer trabajo de investigación corresponde a la empresa alemana Wirtgen GmbH, quienes durante el año de 1998 presentó la primera edición del Manual de Reciclado en Frío. Con el paso del tiempo, el deterioro de la infraestructura vial a nivel mundial ha aumentado y muchos países, por ejemplo, Guatemala enfrenta una progresiva reducción en los estándares de calidad de su infraestructura vial, aumentando así el costo de las operaciones de mantenimiento. A razón de ello, el contenido del manual ha evolucionado mediante revisiones y ediciones, con métodos de mantenimiento para mantener la infraestructura vial en los rangos de nivel de servicio aceptable.¹

¹ WIRTGEN GROUP. *Manual de Reciclado en Frío*. <https://www.wirtgen-group.com/en/>. Consulta: 1 de julio de 2017.

En relación con la presente investigación, la tesina *Evaluación del comportamiento de diferentes tramos de carretera rehabilitados utilizando mezclas recicladas en frío*, presentada en febrero de 2004, realizada por Israel Quesada Vallejo ante la Universidad Politécnica de Catalunya, contempla una investigación científica y de campo, donde se evalúa la viabilidad del método de reciclado en frío ‘in situ’ con emulsiones bituminosas, en proyectos de infraestructura vial en el país catalán².

No obstante, los resultados presentados por el ingeniero Vallejo son satisfactorios, no son directamente aplicable en Guatemala, debido a que la tecnología, control de calidad y principalmente las especificaciones para la construcción de carreteras son diferentes en nuestro país.

De acuerdo con la tesis de graduación *Rehabilitación de carreteras utilizando asfalto espumado, reciclando el pavimento asfáltico existente* del ingeniero Víctor Rosales, en el cual presenta una guía para la rehabilitación de pavimentos utilizando concreto asfáltico reciclado en frío *in situ*; recomienda que a pesar de obtener resultados empíricos satisfactorios: “La realización de los ensayos de laboratorio a los materiales existentes, representan una parte fundamental para el reciclado en frío y posterior estabilización con asfalto espumado debido a que con ellos se establecerá la compatibilidad de los mismos y el aporte que puedan dar a la nueva estructura de pavimento. Por tal motivo, se recomienda contar con el equipo de laboratorio necesario para el análisis de los materiales [...]”³. Por lo tanto, es oportuno realizar una investigación cuantitativa que compare la alteración de las propiedades mecánicas y las características físicas de un suelo estabilizado con dichos materiales.

² QUESADA, Israel. *Evaluación del comportamiento de diferentes tramos de carretera rehabilitados utilizando mezclas recicladas en frío*. p. 12.

³ ROSALES, Víctor. *Rehabilitación de carreteras utilizando asfalto espumado, reciclando el pavimento asfáltico existente*. p. 109.

1.2. Justificación

De acuerdo con lo anterior, se puede afirmar que en varios países el método de reciclado en frío del concreto asfáltico es la opción más viable, en términos de costo/efectividad, para mantener la infraestructura vial en los rangos de nivel de servicio aceptables.

De igual manera, se buscará obtener una solución al problema de disposición de los desperdicios generados en la reparación de carreteras de concreto asfáltico, debido a que el material de desperdicio será integrado en el proceso de reconstrucción de estas. Su objetivo es reducir el impacto ambiental y analizando su viabilidad técnica y financiera.

De acuerdo con la clasificación de suelos que existen en el país, es necesario enfocar el presente trabajo a un tipo de suelo, siendo seleccionado el tipo C-1, indicado en la sección 304-1 del libro *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*⁴.

1.3. Planteamiento del problema

El método de reciclado en frío del concreto asfáltico no es en absoluto novedoso, en las últimas décadas se han realizado investigaciones. Sin embargo, es un postulado que las investigaciones relacionadas con este método en nuestro país son más empíricas y de campo, que estrictamente científicas. Por esta razón, no es posible analizar, explicar y predecir probabilísticamente los resultados de este suelo en nuestro país.

⁴ Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. p. 225.

En la red vial de Guatemala la carpeta de rodadura más común la constituyen el concreto asfáltico. Dicha red vial se considera en buen estado de acuerdo con los índices internacionales presentados en el Plan Operativo Anual de la Dirección General de Caminos. No obstante, para funcionar en óptimas condiciones las carreteras necesitan mantenimiento. Esto representa un problema, porque durante su mantenimiento se generan desperdicios, que dañan el medio ambiente al no ser manejados y depositados de manera adecuada.

Es preciso comprobar, de manera cuantitativa, si es viable la implementación del concreto asfáltico reciclado en sub-bases y bases de suelos tipo C-1, estabilizados mecánicamente con dosificaciones de cemento y cal hidratada. De ser viable, el método permitirá crear una nueva estructura de pavimento que ayudará a reducir el impacto generado al ambiente, verificando técnicamente su viabilidad, bajo las especificaciones vigentes de nuestro país y comprobando su beneficio financiero.

1.4. Mantenimiento de carreteras de concreto asfáltico

Diariamente el término de mantenimiento se utiliza para nombrar cualquier operación que se realiza en la infraestructura vial. No obstante, existen diversos tipos de mantenimiento, incluso excesivos, como la rehabilitación. La rehabilitación es generada por los deterioros en la estructura del pavimento, ocasionando que el mismo ya no sea capaz de brindar el servicio para el cual fue diseñado.⁵

Cuando una vía terrestre es diseñada adecuadamente, y se encuentra en mantenimiento, la necesidad de rehabilitación estructural puede ser

⁵ WIRTGEN GROUP. *Manual de Reciclado en Frío*. <https://www.wirtgen-group.com/en/>. Consulta: 1 de julio de 2017.

considerablemente minimizada. Lamentablemente, en la práctica el mantenimiento requerido no se realiza con frecuencia, haciendo necesaria la rehabilitación tan pronto como sea pronosticada.

1.4.1. Tipos de mantenimiento

De acuerdo con el Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras con Enfoque de Gestión de Riesgo y Seguridad Vial, presentado por el centro de coordinación para la prevención de los desastres naturales en América Central (CEPREDENAC), existen diversos tipos de mantenimiento para una estructura vial, y los clasifica en:

- Mantenimiento preventivo. Tiene por objetivo prevenir de posibles fallas la estructura del pavimento, mediante la identificación y pronóstico de fallas: antes de que sucedan o que exista un alto riesgo que ocurran. Pero como su nombre lo indica, se realizan para prevenir y no es posible garantizar que dichas fallas ocurrirán.
- Mantenimiento periódico. Mantenimiento enfocado a la conservación vial, es realizado en ciclos programados, generalmente de más de un año de intervalo, a fin de mantener la estructura del pavimento en un nivel de servicio bueno o muy bueno. El mantenimiento periódico considera, entre otros, la colocación de sobrecapas en pavimentos deteriorados existentes y el mejoramiento de las capas de la estructura del pavimento.
- Mantenimiento rutinario. Muy similar al mantenimiento periódico, con la excepción que aquí las actividades requeridas para conservar una vía en buen estado se repiten una o más veces al año. También incluye aquellas labores de reparación vial destinadas a recuperar ciertos elementos con

daños menores, tales como los barandales de puentes, obras de drenaje menor, señalización vertical y horizontal, muros de retención y actividades afines.⁶

- Mantenimiento por administración. Se realiza en los casos donde los trabajos que deben realizarse no se pueden cuantificar, no existe una partida de pago en el contrato para cubrirlos o son para ejecutar obras de emergencia o no previstas.
- Mantenimiento por emergencia. Constituye la ejecución de actividades urgentes, inducidas de sucesos de fuerza mayor, como el caso de desastres naturales, y que tienen el propósito de habilitar lo más pronto posible la vía para que permita la libre transitabilidad.

1.4.2. Equipo utilizado

El equipo utilizado para la reconstrucción de carreteras varía de acuerdo con la técnica utilizada. Los dos procesos más comunes son los de pulveración y reprocesamiento. En nuestro país es un postulado que estas técnicas son las más utilizadas para la readecuación de carreteras, pero debido al pobre control de calidad los materiales sobrantes son depositados en lugares inapropiados.

La pulveración es un método simple en el cual la fresadora pulveriza la carpeta de rodadura existente, para posteriormente ser compactada y utilizada como una capa inferior de una nueva estructura, generalmente como base.

⁶ CEPREDENAC. *Manual centroamericano de mantenimiento de carreteras con enfoque de gestión de riesgo y seguridad vial*. <https://goo.gl/fs5LGy>. Consulta: 19 de agosto de 2017.

No obstante, al proporcionar una base granular al nuevo pavimento; no es posible garantizar la capacidad de valor soporte de la misma, sin realizar los ensayos de laboratorio. Además, el material sobrante suele colocarse a un lado de obra donde daña la vegetación del lugar porque los agentes químicos que posee el asfalto son liberados poco a poco.

Figura 1. **Fresadora**



Fuente: WIRTGEN GROUP. *Manual de Reciclado en Frío.*

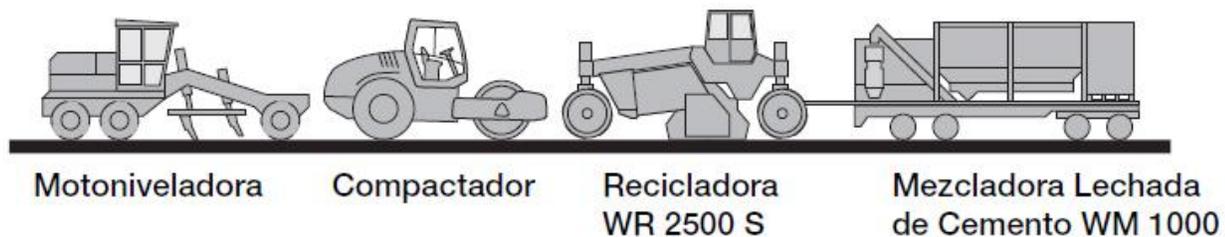
El reprocesamiento es un método en el cual se escarifica y compactan los materiales existentes en el lugar con la finalidad de mejorar su capacidad de soporte, pero solo es aplicable en caminos de terracería o en vías no pavimentadas.

1.4.3. Maquinaria utilizada

Para la aplicación del método de reciclaje en frío existen diversas máquinas que trabajan de manera línea; las cuales como conjunto se denominan tren reciclador con mezclador de lechada, debido a que requieren una dosificación de cemento y agua mezclados con los agentes estabilizadores complementarios.⁷

La configuración típica de un tren reciclador divide el trabajo de rehabilitación de carreteras en cuatro máquinas: motoniveladora, compactador, recicladora y la mezcladora de lechada de cemento. Las figuras siguientes, se presenta un esquema de la maquinaria e imágenes de algunas de ellas:

Figura 2. Tren típico de tren reciclador



Fuente: WIRTGEN GROUP. *Manual de Reciclado en Frío*.

A continuación, se enlistan las funciones que debe cumplir cada una de las máquinas especificadas anteriormente:

⁷ WIRTGEN GROUP. *Manual de Reciclado en Frío*. <https://www.wirtgen-group.com/en/>. Consulta: 1 de julio de 2017.

- La motoniveladora es un tractor utilizador para realizar trabajos de nivelación.
- Compactador se utiliza para compactar mediante neumáticos las mezclas bituminosas tras su tendido.
- La recicladora y la mezcladora se encargan de retirar el material asfáltico deteriorado, mediante un tambor de fresado, para así reciclarlo mediante la adición de aditivos.

Figura 3. **Recicladora Wirtgen WR 2000**



Fuente: WIRTGEN GROUP. *Manual de Reciclado en Frío.*

Figura 4. **Método tradicional de reparación de carreteras**

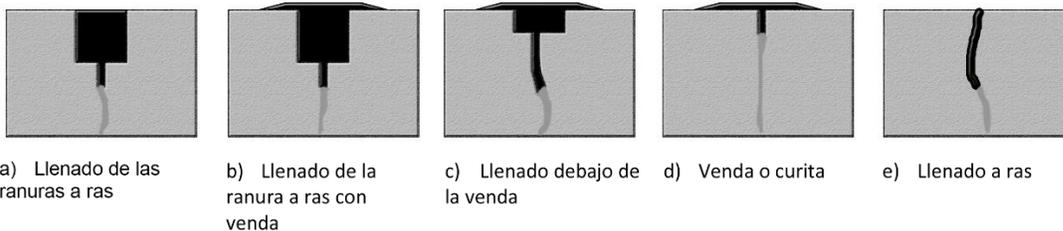


Fuente: WIRTGEN GROUP. *Manual de Reciclado en Frío.*

1.4.4. **Materiales utilizados en el mantenimiento**

En el mantenimiento de carreteras concreto asfáltico, se emplean diversos materiales para sellar fisuras y grietas de la carpeta de rodadura para impermeabilizar las capas que forman la estructura del pavimento, evitando la formación de fallas, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 5. **Configuración de sellos**



Fuente: CEPREDENAC. *Manual centroamericano de mantenimiento de carreteras con enfoque de gestión de riesgo y seguridad vial.*

Los materiales empleados para realizar el mantenimiento preventivo en carreteras con carpeta de rodadura de concreto asfáltico son: materiales bituminosos termoplásticos aplicados en frío, asfalto líquido como emulsión, asfalto líquido modificados con polímeros, sello asfáltico, material secante generalmente arena.

El material bituminoso termoplástico aplicado en frío debe cumplir con las especificaciones de la norma ASTM D-5893. Además, El *Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras* indica que estos materiales poseen poca flexibilidad y son susceptibles a la temperatura por lo que pueden utilizarse como llenadores de grietas.

La emulsión asfáltica empleada debe cumplir con las especificaciones establecidas en la norma AASHTO M 140 para emulsiones asfálticas aniónicas y la norma AASHTO M 208 para emulsiones asfálticas catiónicas; en ambos casos a una temperatura de aplicación entre 20°C y 70°C.

La emulsión asfáltica puede ser modificada mediante la adición de polímero de caucho, siempre que cumpla con lo establecido en la norma ASTM D-5078. La operación antes indicada da flexibilidad al asfalto; sin embargo, el grado de flexibilidad depende básicamente del tipo y naturaleza del asfalto del porcentaje de caucho vulcanizado utilizado y de la forma como se incorpore al asfalto.

Generalmente, se utiliza arena como agregado pétreo seco, de granulometría que pase el tamiz No. 8 (2.36 mm). La arena podrá ser utilizada ya sea triturada o natural, los granos serán densos, limpios y duros, libres de terrones de arcilla y de cualquier material que pueda impedir su adhesión con el asfalto.

Finalmente, el sello asfáltico aplicado en caliente corresponde al recubrimiento de superficial de la estructura del pavimento y debe cumplir con los requisitos establecidos en las especificaciones en las normas AASHTO M-173, ASTM M-282, ASTM D-1190 ó ASTM D-3406.⁸

Además del mantenimiento mediante sellos, existe el bacheo. El bacheo consiste en la reparación de las áreas donde la carpeta de rodadura ha sido parcial o totalmente escarificada. Este proceso se realiza con mezcla en frío o caliente para tener un espesor máximo igual a la existente. Las operaciones unitarias que incluye este mantenimiento son: la excavación, extracción y cuadrado del área que debe repararse, colocación de mezcla asfáltica y el acarreo del punto de fabricación al lugar de colocación.

1.4.5. Mantenimiento y reconformación de carpeta asfáltica

Es el mantenimiento más conveniente cuando la carpeta de rodadura presenta daños, debido a una capacidad de soporte menor que la requerida por la carga vehicular. El proceso radica en que la capa asfáltica escarificada llegue a mezclarse con el material de base presente en la estructura del pavimento para mejorar sus propiedades mecánicas.

Durante las operaciones de escarificación, desintegración, humedecimiento, mezclado, reconformado, compactado y afinado, en las cuales será incorporada la carpeta asfáltica nuevamente a la estructura del pavimento. Idealmente, no se genera material de desperdicio, lamentablemente, existen excepciones, por ejemplo, material contaminado que reduzca la capacidad de soporte del suelo, abundancia de material u cualquier otro inconveniente.

⁸ CEPREDENAC. *Manual centroamericano de mantenimiento de carreteras con enfoque de gestión de riesgo y seguridad vial*. <https://goo.gl/fs5LGy>. Consulta: 19 de agosto de 2017.

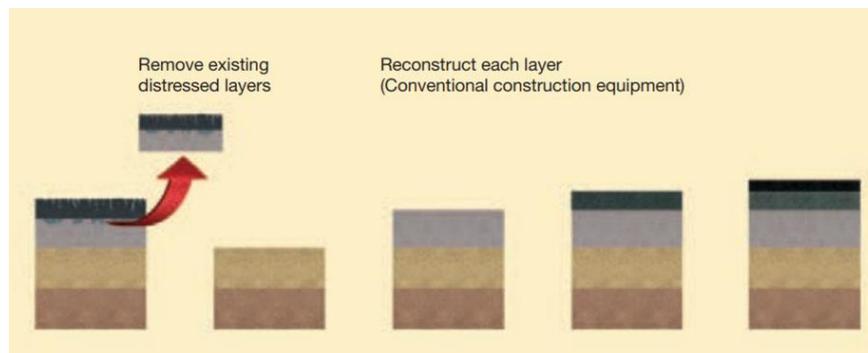
En estos casos el material excedente debe ser extraídos y removidos fuera de la zona de trabajo, y llevada hacia los sitios previamente autorizados.

Por ello, el método expuesto en el párrafo anterior tiende a ser muy efectivo, es necesario realizar ensayos de laboratorio para verificar que el proceso de integrar la carpeta asfáltica con el suelo no afecte su capacidad de valor soporte.

1.4.6. Reconstrucción total de carreteras o método tradicional

La reconstrucción de carreteras o método tradicional es frecuentemente la opción preferida, cuando la estructura del pavimento se encuentra excesivamente dañada, bien sea por cargas vehiculares altas, poco o ningún mantenimiento e incluso un mal diseño. Esencialmente, la reconstrucción implica eliminar toda la estructura anterior y empezar de nuevo. Sin embargo, el material removido se convierte usualmente en desperdicio, que al no ser tratado de manera adecuada genera impacto negativo en el ambiente. A continuación, se represente gráficamente el método tradicional de reparación de carreteras.

Figura 6. **Método tradicional de reparación de carreteras**



Fuente: WIRTGEN GROUP. *Manual de Reciclado en Frío.*

1.4.7. Impacto ambiental generado

Al realizar la construcción de mantenimiento o reconfiguración de estructura vial, es inevitable ocasionar cambios ambientales dentro del área a trabajar. Por lo tanto, el impacto ambiental se puede definir como el producto de la interacción entre el proyecto y su entorno.

En el país, todo proyecto de mantenimiento de la Red Vial debe ser aprobado de acuerdo con el decreto No. 68-86 "ley de protección y mejoramiento del medio ambiente", mediante una licencia ambiental emitida por la dirección de gestión ambiental del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN).

Las obras de mantenimiento vial, generalmente, se clasifican en la categoría B2 "actividades de bajo a moderado impacto ambiental", principalmente, por los desechos sólidos generados y los efectos que tienen sobre el suelo. El MARN considera como desechos peligrosos, todos aquellos que posean una o más de las características siguientes: corrosivos, reactivos, explosivos, tóxicos, inflamables y/o biológico infecciosos; como lo es el concreto asfáltico, el cual es un derivado del petróleo y compuesto casi en su totalidad de bitumen.

Debido a que es imposible no generar un impacto al modificar un espacio, es imprescindible realizar una evaluación cualitativa y cuantitativa de los impactos ambientales, para pronosticar el impacto ambiental e implementar medidas que permitan mitigarlo a través del tiempo y el espacio.

1.4.7.1. Consecuencias del mantenimiento

El mantenimiento de carreteras genera impacto en cuatro medios del ambiente: suelo, aire, agua, flora y social. Pese a que es imposible eliminar el

impacto negativo ocasionado, si es posible implementar medidas de mitigación que permitan controlar el impacto ambiental generado en un proyecto.

1.4.7.2. Medidas de mitigación

De acuerdo con lo establecido en el manual centroamericano de mantenimiento de carreteras, “la realización de un proyecto vial y de cualquier índole implica la elaboración de un estudio de impacto ambiental (EIA), que sirve como herramienta para la mitigación y reducción de daños al ambiente”⁹.

Es importante indicar que el proceso de mitigación no elimina totalmente el problema, que en este caso es la disposición de los desperdicios; generados en la reparación de carreteras de concreto asfáltico. En consecuencia, se asume que no es posible, ni factible, controlar el riesgo existente al grado de impedir o evitar totalmente los daños y sus consecuencias, sino más bien reducirlo a niveles aceptables y factibles.

El *Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras* indica diversas medidas de control ambiental para reducir los daños en el suelo, aire, agua y flora de la región. A continuación, se detallan los más afines al problema que se buscar mitigar en el presente trabajo:

- Contaminación por sedimentos. Con el fin de mitigar el impacto generado al agua, se debe evitar arrojar suelos o material de relleno en los ríos o drenajes pluviales durante construcción de puentes.

⁹ CEPREDENAC. *Manual centroamericano de mantenimiento de carreteras con enfoque de gestión de riesgo y seguridad vial*. <https://goo.gl/fs5LGy>. Consulta: 19 de agosto de 2017.

- Generación de desechos. La medida que recomienda es minimizar la producción de residuos sólidos en general. Sin embargo, si se reemplaza la carpeta de rodadura y no se reutiliza, no es posible minimizar el material extraído, por lo que se debe buscar una planta de tratamiento de residuos sólidos o depositarlos en un lugar donde no perturben el medio ambiente.
- Disposición de desechos. Ubicar los sitios de botadero a una distancia mínima de 200 m de cursos de agua. Pese a que dicha medida de mitigación hace referencia a los desechos sanitarios, es aplicable a los desechos producidos por el mantenimiento, debido a que pueden contaminar el agua y generar un gran impacto ambiental.

2. SITUACIÓN ACTUAL DE LAS CARRETERAS EN GUATEMALA

2.1. Clasificación de las carreteras

En Guatemala existen diferentes rutas que componen la infraestructura vial, las cuales se caracterizan por sus materiales de construcción y se clasifican de acuerdo con su diseño geométrico en: Rutas centroamericanas, nacionales, departamentales y caminos rurales.

2.1.1. Rutas centroamericanas (CA)

Une la capital de la República de Guatemala con alguna frontera del país, con otras rutas centroamericanas o con puertos de importancia. Así mismo, son consideradas en esta clasificación las rutas que atraviesan la República, longitudinal o transversalmente. Además, reúnen las mejores condiciones de diseños, razón por la cual tienen un derecho de vía de 12,50 metros y un área de reserva de 40,00 metros, ambos medidos desde la línea central.

2.1.2. Rutas nacionales (RN)

Son las vías que conectan una cabecera departamental: con una ruta centroamericana o con otra cabecera departamental. Poseen el mismo derecho de vía y área de reserva que una ruta centroamericana, por lo que pueden ser utilizadas como una red auxiliar la misma o conectar estas rutas con un puerto de importancia comercial en el país.

2.1.3. Rutas departamentales (RD)

Son las vías que interconectan las cabeceras departamentales municipales con rutas: centroamericanas, nacionales o inclusive con otras rutas departamentales. Poseen un derecho de vía de 10,00 metros a cada lado de la línea central.

Una ruta se considera de categoría departamental cuando cumple por lo menos dos de los siguientes requisitos:

- Unen rutas nacionales (RN)
- Unen rutas centroamericanas (CA) o nacionales con litorales
- Poseen una longitud mayor a 20 kilómetros
- Tránsito diario mayor de 200 vehículos
- Importancia turística

2.1.4. Caminos rurales (CR)

Conectan a las comunidades rurales de los correspondientes municipios. Habitualmente, no son pavimentadas o bien la estructura de su pavimento es más simple, por ejemplo, de adoquín. Aunque no tienen un derecho de vía definido suelen ser más angostas que las rutas anteriormente descritas, y por lo regular no se encuentran en las mejores condiciones.

2.2. Estado de las rutas en el país

Actualmente, la mayor parte de las actividades económicas en Guatemala dependen de la red vial para conectar diferentes regiones del país. Por esta razón, la infraestructura vial es una de las áreas principales que impulsa el Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. En la actualidad, existen cinco entidades responsables del manteniendo de las vías terrestres del país, las cuales son:

- Proyectos de Bacheo COVIAL
- Proyectos Dirección General de Caminos
- Proyectos de Terracería COVIAL
- Fondo Social de Solidaridad
- Zona Vial de Caminos

De acuerdo con el Poa presentando en el año 2017 por la Dirección General de Caminos, son considerados una diversidad de proyectos; así sean proyectos en estado de: ejecución o planificación. Es importante mencionar que las principales acciones de la Dirección General de Caminos, durante la actual administración, se enfocaran, principalmente, en el plan de carreteras seguras. De acuerdo con la estrategia “Infraestructura productiva para un país competitivo”, la cual tiene como propósito recuperar la infraestructura vial en apoyo a la producción socioeconómica del país.

2.2.1. Rutas en mantenimiento pavimentadas

Por medio de la Dirección General de Caminos, a través de la unidad ejecutora de conservación vial se realizó la medición y la auscultación de la red vial pavimentada de Guatemala para clasificar el estado actual de estas, por medio del índice de rugosidad internacional o IRI, el perfil de la superficie del pavimento o ahuellamiento y la profundidad de textura.

- Índice de rugosidad internacional IRI

El índice de rugosidad internacional es un parámetro medido en la carpeta de rodadura de los pavimentos, utilizado para determinar su regularidad y comodidad durante el manejo de un vehículo.¹⁰ Según el estado del pavimento el IRI puede ser clasificado de la siguiente manera:

Tabla I. Clasificación por medio del IRI

Estado del pavimento	IRI (m/Km)
Bueno	$IRI \leq 3,5$
Regular	$3,5 \leq IRI \leq 4,5$
Malo	$3,5 \leq IRI \leq 6$
Pésimo	$IRI \geq 6$

Fuente: Dirección General de Caminos.

El IRI se calcula mediante una expresión matemática que relaciona la velocidad y masa del vehículo, con el amortiguamiento entre el pavimento con las llantas y la suspensión existente entre las llantas con la masa que está transportando, en la práctica es medido mediante un perfilómetro.

¹⁰ Dirección General de Caminos. *Plan Operativo Anual*. <http://www.caminos.civ.gob.gt/files/Art10Num052017PoaDGC.pdf>. Consulta: 11 de julio de 2017.

De acuerdo con la clasificación por medio del IRI que se observa en la tabla I, los resultados para la red vial pavimentada en el país son:

Tabla II. **Resultados del IRI en el país**

Red vial	Bueno	Regular	Malo	Pésimo	Total
Rutas centroamericanas (Km)	1538,99	112,54	84,08	4,86	1740,47
Rutas nacionales (Km)	508,57	234,68	248,16	124,08	1115,49
Rutas de interconexión (Km)	37,92	44,44	0,00	0,00	82,36
Rutas departamentales (Km)	1261,2	343,08	478,4	341,68	2424,36
Longitud (Km)	3346,68	734,74	810,64	470,62	5362,68
Longitud porcentaje	62,41%	13,70%	15,12%	8,78%	100,00%

Fuente: Dirección General de Caminos.

- Profundidad de textura

Indica el grado de rugosidad existente en el pavimento con relación a la profundidad de la textura. Así mismo, estima la fuerza de fricción que se ejerce entre las ruedas del vehículo con la carpeta de rodadura y el trabajo realizado por los amortiguadores. Con relación a este parámetro las vías terrestres se clasifican de la siguiente manera:

Tabla III. **Clasificación según su textura**

Estado del pavimento	Textura (mm)
Bueno	Textura > 0,60 mm
Regular	0,40 mm ≤ Textura ≤ 0,60 mm
Resbaladizo	Textura < 0,40 mm

Fuente: Dirección General de Caminos.

De acuerdo con la clasificación según la profundidad de textura, los resultados para la red vial pavimentada en el país son:

Tabla IV. **Resultados del IRI en el país**

Red vial	Bueno	Regular	Malo	Total
Rutas centroamericanas (Km)	456,78	679,4	604,29	1740,47
Rutas nacionales (Km)	698,49	140,68	276,32	1115,49
Rutas de interconexión (Km)	57,86	0,00	24,5	82,36
Rutas departamentales (Km)	1116,96	682,08	625,32	2424,36
Longitud (Km)	2330,09	1502,16	1530,43	5362,68
Longitud porcentaje	43,45%	28,01%	28,54%	100,00%

Fuente: Dirección General de Caminos.

Los datos presentados anteriormente son del Plan Operativo Anual de la Dirección General de Caminos, el cual concluye que "la red vial de Guatemala se encuentra en un estado bueno a regular debido a la medición de las propiedades explicadas con anterioridad [...]"¹¹. No obstante, es necesario el debido mantenimiento y rehabilitación de los tramos carreteros para garantizar su óptimo funcionamiento.

Por tal razón la Dirección General de Caminos tiene como objetivo incrementar, mejorar y dar mantenimiento a la infraestructura vial registrada en el país. Así mismo, uno de sus principales objetivos es incrementar los kilómetros de carreteras pavimentadas en un 2,77%, de acuerdo con su plan operativo del año 2017.

¹¹ Dirección General de Caminos. *Plan Operativo Anual*. <http://www.caminos.civ.gob.gt/files/Art10Num05-2017-PoaDGC.pdf>. Consulta: 11 de julio de 2017.

2.2.2. Rutas en mantenimiento de terracería

Las vías terrestres construidas de terracería son necesarias debido a la insuficiente cantidad de carreteras asfaltadas en el área rural del país. Razón por la cual se han construido, hasta enero de 2017, aproximadamente 16176130 kilómetros de carretera de terracería y caminos rurales dentro de la República, de acuerdo con el Plan Operativo del 2017 de la Dirección General de Caminos.

2.2.3. Rutas de terracería pendientes de programación por presupuesto

Las dificultades de acceso de la población a los bienes y servicios básicos debido a una deficiente carpeta de rodadura, conduce a un incremento de la pobreza. Razón por la cual, la población del área rural del país en condición de pobreza es la más afectada.

La problemática principal que afrontan las vías terrestres de terracería es su deterioro causado por las condiciones climáticas de la región, principalmente durante la temporada de lluvia. Dicho deterioro induce a la necesidad de dar mantenimiento de manera más frecuente a la infraestructura, no obstante, los altos costos que el mantenimiento representa deriva en problemas tales como: atraso en su programación, suspensión o aplazamiento.

Con el fin de obtener una solución la Dirección General de Caminos, en su Plan Operativo Anual, han planteado propuestas al Gobierno de Guatemala solicitando la emisión de Bonos del Tesoro o una ampliación presupuestaria. Así mismo, se expone la insuficiente cantidad de rutas de carreteras asfaltadas en el área rural y hace énfasis al valor implícito de mejorar la carpeta de rodadura a dichas rutas.

2.2.4. Rutas registradas oficialmente

De acuerdo con el registro oficial de la Dirección General de Caminos, Guatemala posee en la actualidad una red vial de aproximadamente 15600 kilómetros, distribuidos en los 22 departamentos de la república. La red vial es clasificada conforme a las rutas mencionadas en los subcapítulos 2.1.1 al 2.1.4 del presente trabajo, pero debemos aclarar que pueden que estos datos no sean exactos, sino más bien precisos:

Tabla V. Rutas oficialmente registradas en el país

Departamento	Material de Construcción			Total (kms)
	Rígido	Asfalto	Terracería	
Guatemala (Km)	79,5	625,45	157,18	862,13
El progreso (Km)	0	127,4	109,32	236,72
Sacatepéquez (Km)	34	97,29	45,39	176,68
Chimaltenango (Km)	0	162	821,59	983,59
Escuintla (Km)	45	457,4	368	870,4
Santa Rosa (Km)	0,25	314,75	369,22	684,22
Sololá (Km)	4,3	172,6	294,09	470,99
Totonicapán (Km)	1,9	95,86	451,88	549,64
Quetzaltenango (Km)	35,69	321,49	339,75	696,91
Suchitepéquez (Km)	0	230	269,82	499,82
Retalhuleu (Km)	0	148,52	125,2	273,72
San Marcos (Km)	0	397,5	712,51	1110,01
Huehuetenango (Km)	0	341,6	788,99	1130,59
Quiche (Km)	0	364,45	744,81	1109,26
Baja Verapaz (Km)	0	103	410,46	513,46
Alta Verapaz (Km)	0	301	802,12	1103,12
Peten (Km)	0	402,8	1092,93	1495,73
Izabal (Km)	12,1	167,28	331,25	510,63
Zacapa (Km)	0	245,85	302,9	548,75
Chiquimula (Km)	0	228,2	363,55	591,75
Jalapa (Km)	0	159,66	422,23	581,89
Jutiapa (Km)	0	335,2	276,84	612,04

Fuente: Dirección General de Caminos.

2.2.5. Proyectos de mantenimiento vial 2017

El mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura vial del país es necesaria para llegar a un nivel óptimo de servicialidad. Por consiguiente, la Dirección General de Caminos planifica los tramos carreteros a los cuales se dará mantenimiento en el 2017. Los tramos en mantenimiento están a cargo de las entidades presentadas en la sección 2.2 del presente trabajo y se encuentran distribuidos en los 22 departamentos de la república.

Tabla VI. Red vial en mantenimiento

Departamento	Longitud en kilómetros			
	CR	RN	RD	CA
Guatemala (Km)	39,38	85,41	466,8	90,59
El progreso (Km)	36,12	26,18	103,2	88,68
Sacatepéquez (Km)	8,5	78,09	74,64	30,59
Chimaltenango (Km)	361	81,53	228,15	54,44
Escuintla (Km)	0	62,3	566,02	183,32
Santa Rosa (Km)	71,45	53,95	392,26	0
Sololá (Km)	50,75	92,6	201,49	71,03
Totonicapán (Km)	81,73	73,02	135,28	14,74
Quetzaltenango (Km)	129,07	138,29	214,44	0
Suchitepéquez (Km)	25,43	30,22	290,16	0
Retalhuleu (Km)	81	43,96	97,63	0
San Marcos (Km)	151,85	279,47	357,72	45,28
Huehuetenango (Km)	302,27	216,81	247,42	80,5
Quiche (Km)	264,63	181,27	433,27	0
Baja Verapaz (Km)	138,26	68,98	140,37	42,93
Alta Verapaz (Km)	138,47	45,82	498,53	47,3
Peten (Km)	127,2	127,6	1190,03	228,48
Izabal (Km)	83	42,36	214,43	161,02
Zacapa (Km)	0	9,87	305,19	107,91
Chiquimula (Km)	73,98	74,51	246,78	137,21
Jalapa (Km)	33,51	129,94	104,95	0
Jutiapa (Km)	54,41	50,78	355,24	0

Fuente: Dirección General de Caminos.

2.2.6. Puntos de control de carga por vehículo

La falla de un elemento se produce tanto por deformación o fluencia, como por separación de sus partes. En consecuencia, al fallar un elemento este pierde la función a la cual fue diseñado y por ende perturba la estructura a la que pertenece. La falla en cualquier material se presenta cuando, el esfuerzo al que se encuentra sometido es mayor a su tenacidad, o expresado de otra manera, el elemento falla cuando es sometido a una carga mayor a la que es capaz de resistir. Por tal razón es importante cuidar cuales son las cargas máximas que deberá soportar una estructura.

Es notorio que la infraestructura vial ha contribuido a la economía del país y colaborado con el fortalecimiento del desarrollo social. Por tal razón, la red vial es una “inversión que debe protegerse a través de programas para el control de cargas y reglamentar los pesos y dimensiones de los vehículos que circulan sobre carreteras evitando la destrucción y deterioro prematuro de infraestructura vial”¹².

Con el fin de obtener una solución al deterioro prematuro de la infraestructura vial, el Ministerio de Comunicaciones Infraestructura y Vivienda, en el Acuerdo Gubernativo 319-2010, establece las cargas permisibles para todo tipo de vehículos o combinaciones de vehículos que circulen por la red vial guatemalteca. En este, regula las circunstancias en los cuales se podrán hacer excepciones al reglamento, en este caso la Dirección General De Caminos expedirá permisos especiales o concederá la autorización para que el vehículo pueda trasladarse.

¹² Ministerio de Comunicaciones Infraestructura y Vivienda. *Reglamento para el control de pesos y dimensiones de vehículos automotores de carga y sus combinaciones*. p. 2.

Con el propósito de verificar los pesos y las dimensiones de los vehículos que circulan por la infraestructura vial, se ha implementado estaciones de control, las cuales pueden ser de pesajes fijos o con equipo de báscula móvil. En la actualidad, el país cuenta con cuatro estaciones de control, las cuales están ubicadas en:

- Puerto Barrios, Izabal, km. 288 ruta ca-9 norte
- Escuintla km. 64+629 ruta ca-9 sur “a”
- Puerto Quetzal, Escuintla km. 98+639 ruta ca-9 sur “a”
- Tecún Umán, San Marcos km. 250, bifurcación ca-2 occidente “a”

Figura 7. **Estación de control: Puerto Barrios**



Fuente: *Acuerdo gubernativo 379-2010.*

Figura 8. **Estación de control: Escuintla**



Fuente: *Acuerdo gubernativo 379-2010.*

Figura 9. **Estación de control: Puerto Quetzal**



Fuente: *Acuerdo gubernativo 379-2010.*

Figura 10. **Estación de control: San Marcos**



Fuente: Acuerdo gubernativo 379-2010.

Figura 11. **Estación de control con báscula móvil**



Fuente: Acuerdo gubernativo 379-2010.

2.3. Kilómetros de carreteras construidas de pavimento flexible

La infraestructura vial en el país puede clasificarse de acuerdo con el tipo de material de construcción utilizado en su carpeta de rodadura. Con base en lo anterior, las carreteras se clasifican como construidas de pavimento asfáltico flexible, pavimento de concreto rígido y terracería. De acuerdo con la información de la Dirección General de Caminos, presentada en la tabla V del presente trabajo, las carreteras pavimentadas representan aproximadamente dos quintas partes de infraestructura vial, como se muestra a continuación.

Tabla VII. **Carreteras de acuerdo con su carpeta de rodadura**

Datos	Material de Construcción			Total
	Rígido	Asfalto	Terracería	
Longitud (Km)	212,74	5 799,3	9 600,03	1 5612,05
Porcentaje	1,36%	37,15%	61,49%	100,00%

Fuente: Dirección General de Caminos.

Debido a que el enfoque del presente trabajo son las carreteras cuya carpeta de rodadura es de concreto asfáltico, es necesario conocer el porcentaje de carreteras que se encuentran pavimentadas con este tipo de material.

Tabla VIII. **Carreteras de acuerdo con su tipo de pavimento**

Datos	Pavimento		Total
	Rígido	Asfalto	
Longitud (Km)	212,74	5 799,3	6 012,04
Porcentaje	3,54%	96,46%	100,00%

Fuente: Dirección General de Caminos.

2.3.1. Estimación de kilómetros en mal estado

De acuerdo con la tabla número seis de este trabajo, es posible conocer la cantidad exacta de kilómetros de carretera que recibirán mantenimiento durante el año 2017. No obstante, la Dirección General de Caminos eligió la clasificación de rutas, descrita en la sección 2.1, como cualidad para agrupar los tramos en mantenimiento y no según el material del cual está compuesto su carpeta de rodadura. En consecuencia, se realizó una estimación de la infraestructura vial construida con concreto asfáltico flexible que se encuentra en mal estado.

La información proporcionada por la Dirección General de Caminos en el Plan Operativo Anual, la red vial nacional puede clasificarse de acuerdo con tres categorías: red primaria, red secundaria y red terciaria. Dicha clasificación es relevante; porque indica los kilómetros de carretera pavimentada y de terracería, correspondientes a cada ruta.

Tabla IX. Rutas de acuerdo con su carpeta de rodadura

Material	Ruta			
	CA	RN	RD	CR
Pavimento (Km)	2 145,20	1 822,90	3 372,30	0
Terracería (Km)	0	1 088,80	4 019,10	4 412,40
<i>Total (Km)</i>	<i>2 145,20</i>	<i>2 911,70</i>	<i>7 391,40</i>	<i>4 412,40</i>
Porcentaje según ruta				
Pavimento	100,00%	62,61%	45,62%	0,00%
Terracería	0,00%	37,39%	54,38%	100,00%

Fuente: Dirección General de Caminos.

La información expuesta en las tablas VI y IX permitió cuantificar el kilometraje de infraestructura vial en mantenimiento, cuya carpeta de rodadura se constituye de concreto asfáltico. A continuación, se tabulan los datos estimados.

Tabla X. **Estimación de kilómetros en mantenimiento para carreteras de pavimento flexible**

Mantenimiento	Longitud en kilómetros				Total (kms)
	CA	RD	RN	CR	
Pavimento (Km)	2 252,01	1 247,71	3 131,68	0,00	6 631,40
* Flexible (Km)	2 172,32	1 203,56	3 020,86	0,00	6 396,74
* Rígido (Km)	79,69	44,15	110,82	0,00	234,66

Fuente: Dirección General de Caminos.

2.4. Causas del deterioro

La red vial, como cualquier infraestructura, necesita de mantenimiento o de lo contrario se deteriora en forma lenta y progresiva hasta llegar a su punto de falla. El mismo es ocasionado por diversos factores, como su diseño, métodos de construcción, ejecución e inclusive factores ambientales y sobrecargas de tránsito.

2.4.1. Drenaje deficiente

La presencia del agua ocasiona un deterioro prematuro en la estructura del pavimento, debido a que la humedad perturba las propiedades del suelo. Por tal razón, un drenaje eficiente es importante para mantener propiedades, como la capacidad de soporte de la base y la sub-base, lo que avala un buen diseño.

La presente tabla, fue obtenida de la guía para el diseño de estructuras de pavimento publicada por la AASHTO, en la cual se clasifican los suelos de acuerdo con su capacidad para drenar un grado de saturación del cincuenta por ciento.

Tabla XI. **Clasificación de suelos de acuerdo con su capacidad de drenaje**

Calidad de Drenaje	Drenaje al 50 % de saturación en:
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Regular	1 semana
Pobre	1 mes
Muy pobre	El agua no drena

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

2.4.2. Diseño deficiente

Los diversos elementos que afectan a un tipo de estructura deben ser considerados al momento de diseñar una obra vial. Los factores medio ambientales y la carga vehicular son los responsables de la mayor parte del inicio del deterioro del pavimento. A razón de ello, el diseño estructural y el sanitario son los más relevantes para este tipo de obra.

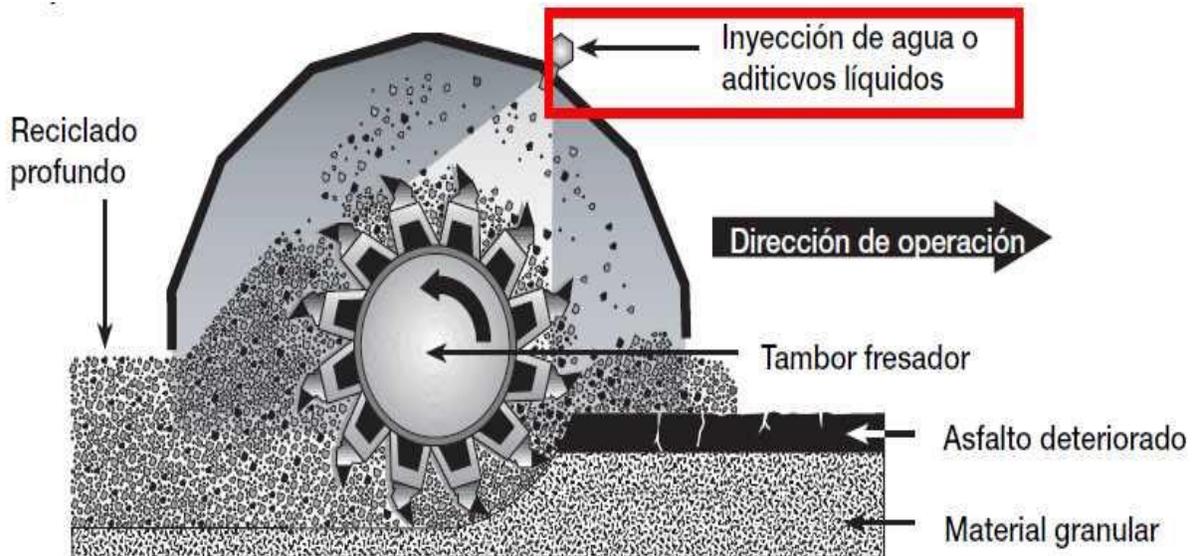
Un diseño eficiente y viable económicamente, necesita ser ejecutado con el método constructivo adecuado, para que la obra sea considerada segura y funcional, en caso contrario la obra tenderá a deteriorarse de manera acelerada; reduciendo el tiempo de vida útil de la misma.

2.4.3. Método constructivo inadecuado

El método constructivo inadecuado es definido por el tipo de mantenimiento que se desea realizar según la sección 1.4.2, y por la maquinaria utilizada de acuerdo con la sección 1.4.3, pero en ambos casos el método constructivo se ve afectado por el uso incorrecto de los agentes estabilizadores y el agua.

El agua, cemento, cal, emulsión asfáltica y otros agentes estabilizadores pueden ser adheridos mediante una mezcla manual, sin embargo, no es lo más recomendable porque no se tiene un control exacto del material utilizado. Por lo tanto, la adhesión de estos agentes estabilizadores se puede lograr mediante la inyección directa de aditivos en una maquina recicladora, como se muestra en la siguiente figura:

Figura 12. Adición de aditivos



Fuente: WIRTGEN GROUP. *Manual de Reciclado en Frío.*

El método antes mencionado permite reciclar el concreto asfáltico, generando una base más resistente. El material obtenido es considerado una nueva capa de la estructura del pavimento que debe ser compactado como cualquier otro material, no considera que este hecho es uno de los errores más comunes en campo. Debido a que la humedad óptima del nuevo suelo es diferente a la del suelo inalterado, por la modificación de sus características físicas, para lo cual se requiere realizar una prueba de compactación tipo Proctor y verificar la humedad óptima *in situ*.

El método más común para medir la humedad óptima *in situ* o humedad de campo, es mediante el medidor de humedad tipo “*speedy*” estandarizado bajo la norma ASTM D 4944 u AASHTO T 217. El “*speedy*” mezcla una muestra de suelo previamente pesado con carburo de calcio en el interior de una cámara hermética. Dicha mezcla genera un gas acetilénico el cual provoca una presión manométrica mediante la cual se calcula indirectamente la humedad del suelo. En la siguiente figura se muestra un medidor tipo “*speedy*”:

Figura 13. **Medidor de humedad tipo “*speedy*”**



Fuente: Slideshare. Consulta: 15 de marzo de 2018.

El segundo factor importante en el método constructivo es la compactación, la cual se realiza mediante la maquinaria especificada en la sección 1.4.3. Sin embargo, la compactación debe ser verificada por medio de ensayos de densidad de campo, el procedimiento más utilizado es el método del cono de arena estandarizado bajo la norma ASTM D 1556 u AASHTO T 191.

El método del cono de arena utiliza un aparato en forma de cono adherido a un recipiente con una válvula cilíndrica, en donde el recipiente contiene arena estandarizada; comúnmente llamada “arena de Ottawa”, así como balanzas para medir el contenido de arena depositada mediante el ensayo. El procedimiento, a pesar de ser sencillo, requiere de atención al detalle, porque una compactación incorrecta generara una base que posiblemente no cumpla los requerimientos para la cual fue diseñada.

Figura 14. **Adicción de aditivos**



Fuente: UTEST. Consulta: 15 de marzo de 18.

2.4.4. Condiciones ambientales

En los países, las vías terrestres se construyen bajo los mismos principios generales de diseño sin importar la condición ambiental. Sin embargo, la exposición a los fenómenos naturales produce alteraciones en las propiedades de los elementos estructurales del pavimento, las cuales ocasionan efectos negativos tanto superficiales como internos.

Los efectos superficiales son los que afectan principalmente la carpeta de rodadura, los cuales se dividen en tres grupos:

- Efectos térmicos. Originan cambios de volumen, debido a la expansión y contracción que sufren los materiales al ser expuestos a un gradiente de temperatura.
- Efectos de congelamiento. Se origina por ciclos iterativos de enfriamiento y calentamiento extremo, el cual produce un daño en la estructura del pavimento a través de un fenómeno llamado hinchamiento.
- Efectos de radiación. Producidos por la radiación ultravioleta aplicada sobre la superficie del pavimento el cual produce oxidación en el asfalto, volviéndolo frágil a través de un proceso conocido como envejecimiento.

Entre los efectos internos se encuentra el agua, la cual es una de las principales causas que afectan estructuralmente a la base y la sub-base del pavimento. La saturación con agua provoca que el suelo cambie de un estado sólido a un estado plástico, ocasionado que el mismo sea más deformable. Además, la capacidad de soporte del suelo en condición seca; siempre mayor que en estado húmedo, y en especial en suelos cohesivos.

2.4.5. Sobrecarga de tránsito

La acción de aplicar carga en una estructura genera esfuerzos internos en cada elemento estructural. Tales esfuerzos inducen a deformaciones que, al ser excesivas, ocasionan fallas. Resulta evidente que el tránsito es la carga que provoca deformaciones en la estructura del pavimento. Adicionalmente es una carga dinámica, por tal razón las deformaciones que produce son momentáneas.

No obstante, el esfuerzo ocasionado es muy variable entre cada vehículo, por lo cual el pavimento es diseñado estimando una carga máxima. En consecuencia, los vehículos livianos producen deformaciones insignificantes, mientras que los vehículos pesados producen grandes deformaciones en periodos cortos de tiempo.

Resulta evidente que la circulación de los vehículos en una vía terrestre produce un efecto acumulativo que progresivamente deforma y/o fatiga la estructura. “Es importante destacar que los ejes sobrecargados de los camiones pesados producen un efecto extremadamente nocivo en la estructura de pavimento, acelerando el deterioro”¹³.

2.5. Consecuencias del deterioro en pavimentos asfálticos

Las fallas ocasionadas en la estructura del pavimento son producidas por la diversidad de factores que inciden su deterioro. Regularmente, dichos factores ocurren de manera combinada y no en forma aislada. A razón de ello, se da origen a una serie de fallas en la carpeta de rodadura, debilitando las capas inferiores y disminuyendo la capacidad de soporte de este.

¹³ WIRTGEN GROUP. *Manual de Reciclado en Frío*. <https://www.wirtgen-group.com/en/>. Consulta: 1 de julio de 2017.

2.5.1. Infiltración

Las variaciones diarias de temperatura de la mezcla asfáltica generan esfuerzos internos que inducen a que la estructura sufra ciclos de contracción y dilatación. Dichos cambios volumétricos combinados con los periodos de carga vehicular generan fisuración en la carpeta de rodadura, la cual se considera impermeable en el diseño. Sin embargo, en presencia de dichas grietas, el agua es capaz de penetra la carpeta de rodadura hasta llegar a las capas inferiores del pavimento, en una acción del agua conocida como infiltración.

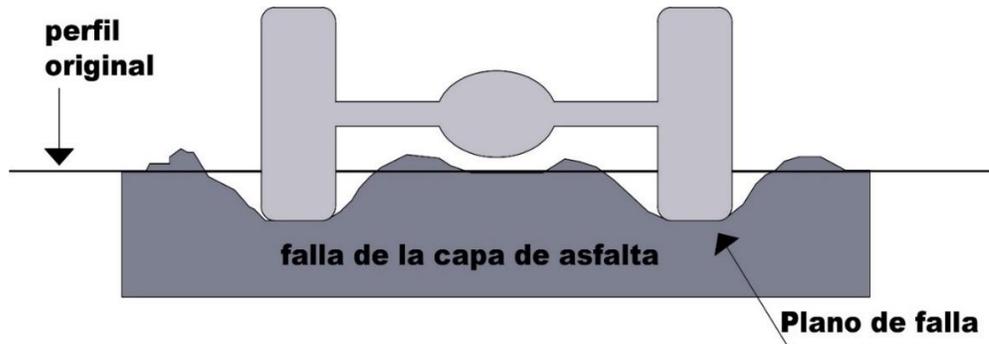
La infiltración del agua afecta toda la estructura del pavimento, principalmente la base y sub base. Dado que “la saturación con agua provoca en el suelo cambiar de un estado sólido a un estado plástico, ocasionado que el mismo sea más deformable. Además, la capacidad de soporte del suelo en condición seca; siempre mayor que en estado húmedo, y en especial en suelos cohesivos.”¹⁴

2.5.2. Deformaciones

La relación entre la presión de contacto de la llanta y la carpeta de rodadura genera cambios diferenciales en la sección transversal del pavimento debido al ciclo de carga y descarga. La acumulación de dichas variaciones en el esfuerzo del concreto asfáltico genera deformaciones irrecuperables, las cuales son apreciables a simple vista, como se muestra a continuación:

¹⁴ MORALES, Carlos. *Control de calidad en la evaluación de pavimentos existentes*. p. 25.

Figura 15. **Deformaciones en el pavimento**



Fuente: Universitat Politècnica de Catalunya. Deformaciones en capas de rodadura.

La importancia de medir las deformaciones es por su aplicación en algunos métodos de diseño para la rehabilitación de carreteras. Las deformaciones se utilizan para analizar la respuesta de un pavimento bajo el esfuerzo generado por una o varias cargas vehiculares. Estas medidas permiten realizar un análisis retroactivo del módulo de resiliencia de las capas requeridas para crear un perfil de respuesta.¹⁵

Existen diversos métodos para medir dichas deformaciones, en campo usualmente se utiliza la placa de carga estandarizada por la norma ASTM D 1194, o en caso de querer analizar el pavimento reciclado en la base es posible usar el método de ensayo del triaxial cíclico estandarizado por la norma ASTM D 5311.

2.5.3. Ahuellamiento

Es un tipo de falla presentada en pavimentos asfálticos. Consiste en una depresión localizada en la huella de circulación del tránsito. El ahuellamiento es

¹⁵ ROSALES, Víctor. *Rehabilitación de carreteras utilizando asfalto espumado, reciclando el pavimento asfáltico existente*. p. 44.

ocasionado debido a la combinación de diversos factores que afecta el pavimento, como elevados niveles de tránsito, tráfico pesado y/o lento, y altas temperaturas de servicio. Por otra parte, las deformaciones ocasionadas por este tipo de falla pueden tener origen en la carpeta de rodadura o en las capas subyacentes.

El ahuellamiento de la carpeta de rodadura son pequeñas deformaciones plásticas que se presentan cada vez que se aplica una carga sobre el pavimento. En este caso, las deformaciones son inducidas debido a que “el asfalto exhibe un comportamiento viscoelástico a temperaturas de servicio, esto es, las deformaciones que presenta ante cargas corresponden a una combinación entre deformación plástica (o viscosa) y elástica.”¹⁶

El ahuellamiento en las capas inferiores ocurre principalmente por una mala compactación de las bases, también por generarse tensiones de trabajo mayores a las admisibles en la subrasante. En otras palabras, las causas de esta falla son de tipo constructivo, un mal estudio de suelos, y/o un mal diseño estructural del pavimento.

2.5.4. Desprendimiento

La desintegración de la capa superficial del pavimento, carpeta de rodadura, es ocasionada por la pérdida de la emulsión asfáltica en la mezcla. A razón de ello, las partículas de la composición asfáltica se separan y ocasionan el desprendimiento del agregado pétreo. Los principales factores que origina este tipo de falla son la pérdida de las propiedades cohesivas de la mezcla asfáltica: una mala proporción de la mezcla asfáltica con relación al agregado pétreo; agregado con impurezas o con un alto grado de absorción; deficiencia en el

¹⁶THENOUX. G. Análisis de casos de ahuellamiento en mezclas asfálticas chilenas. http://www2.udec.cl/~provia/trabajos_pdf/16GmoThenouxAhuellamiento.pdf. Consulta: 08 de agosto de 2017.

proceso constructivo; la presencia en la carpeta de rodadura de solventes derivados del petróleo, como por ejemplo Diesel o gasolina.

2.5.5. Fisuración

Las fisuras son grietas de la carpeta de rodadura, localizadas donde los esfuerzos de tracción son mayores y las cargas se repiten con mayor frecuencia. Este tipo de falla es más común en pavimentos de concreto asfáltico flexible que en concreto rígido. Esta se divide en tres categorías: Transversal, longitudinal y de arco.

Transversales. Son originadas debido a la contracción del concreto asfáltico por bajas temperaturas o al endurecimiento del asfalto debido al exceso de emulsión en la mezcla asfáltica. Estas grietas no están asociadas a las cargas del tránsito. De igual forma, las fisuras transversales pueden originarse en los pavimentos asfálticos, cuando son tendidos sobre pavimentos hidráulicos, debido a que las deformaciones térmicas de cada material no son iguales. Por último, otra posible causa es la mala ejecución de las juntas de construcción.

Longitudinales. Son fisuras relacionadas con las cargas de tránsito, a razón de ello, aparecen en forma paralela al eje de la carretera. No obstante, también son inducidas por: contracción del concreto asfáltico debido a bajas temperaturas o al endurecimiento del asfalto, juntas defectuosas o excesivo movimiento de ellas, deficiente confinamiento lateral procedente de mal método constructivo.

Arco. Fisuras en forma de cuarto de luna o media luna, con la misma dirección que los vectores generados por las fuerzas de tracción de las ruedas sobre el pavimento. Las fisuras en forma de arco pueden ser inducidas por la combinación de una mezcla asfáltica de baja estabilidad, una deficiente

adherencia entre la superficie y la siguiente capa del pavimento, un exceso de emulsión o la presencia de polvo durante la ejecución, espesores de carpeta muy reducidos a los requeridos.

2.5.6. Bache

Es generado por la desintegración total de la carpeta de rodadura, así mismo, puede extenderse a otras capas del pavimento. Los baches son uno de los tipos de fallas más comunes en las carreteras son el resultado de alguno de los siguientes factores: mal diseño del pavimento es decir espesores insuficientes; defectos constructivos, filtración y retención de agua, abrasión de la carpeta de rodadura por el tránsito, mala estimación del número estructural requerido, e incluso una combinación de todas las anteriores.

2.5.7. Hundimiento

Este tipo de falla consiste en concavidades localizadas en la superficie de la carpeta de rodadura. Los hundimientos regularmente son ocasionados por asentamientos de la sub-rasante o por deferencias durante el proceso constructivo, por ejemplo: una mala compactación en la base y/o sub-base, mal drenaje o falta de mantenimiento a los drenajes. Este tipo de falla se considera muy grave, porque su reparación afecta a todas las capas del pavimento.

2.5.8. Hinchamiento

El hinchamiento es una falla localizada que genera abultamientos en la carpeta de rodadura. Generalmente, presentan la forma de una onda que distorsiona el perfil de la carretera. El agua es la principal responsable del hinchamiento. El agua puede entrar en contacto el suelo al infiltrarse en las capas

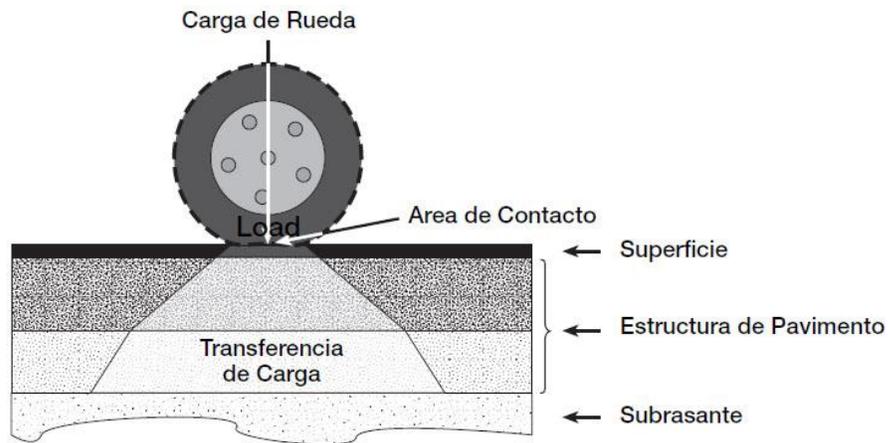
inferiores del pavimento, lo que ocasiona cambios volumétricos. De la misma forma que sucede con el hundimiento, las reparaciones de este tipo a todas las capas que componen la estructura del pavimento.

3. CARACTERIZACIÓN DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES

3.1. Elementos constituyentes del pavimento flexible

El pavimento es un conjunto estable de elementos resistentes con la finalidad de soportar y transmitir las cargas, por eso, se considera como estructura. Los elementos constituyentes se denominan capas. Existe una única capa visible denominada carpeta de rodadura. El límite entre la estructura del pavimento y el material natural del lugar es conocido como sub-rasante.

Figura 16. **Transferencia de carga a través del pavimento**



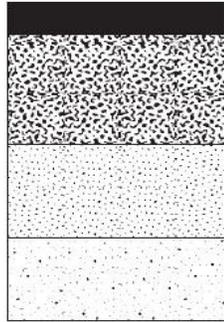
Fuente: WIRTGEN GROUP. *Manual de Reciclado en Frío*, 2004.

La estructura del pavimento se diseña de tal manera que realice el trabajo de soportar las cargas producidas por el contacto de la rueda con la superficie. El esfuerzo inducido por las cargas de tránsito se transfiere o disipa debido a que la carga es distribuida en un área más grande, cada vez que pasa a capas

inferiores hasta llegar a la sub-rasante. La estructura del pavimento disipa los esfuerzos inducidos por la carga de tránsito a medida que aumenta el área de influencia desde la superficie hasta la subrasante, como se ilustra en la Figura 16.

El pavimento, generalmente, está constituido por varias capas de distintos materiales. Dado que, los esfuerzos son mayores en las capas superiores que en las inferiores, los materiales son menos resistentes a medida que se desciende en cada carpeta.

Figura 17. **Estructura típica del pavimento flexible**

<i>Posición relativa en la estructura</i>		<i>Material de construcción</i>
	Superficie	Asfalto o sello asfáltico
	Base	Mezcla asfáltica/granular estabilizado con asfalto o cemento/granular
	Subbase	Granular estabilizado con asfalto o cemento/granular
	Subrasante	Granular estabilizado con cemento/granular/material in-situ

Fuente: WIRTGEN GROUP. *Manual de Reciclado en Frío*, 2004.

3.1.1. **Subrasante**

La subrasante es la primera capa, en trayectoria ascendente, que conforma la estructura del pavimento. Se construye de terreno natural, soporta la estructura del pavimento y se extiende hasta una profundidad en que no le afecte la carga de diseño. Tiene la particularidad de otorgar la respuesta estructural y el

comportamiento del pavimento. Por esta razón, su calidad define el espesor de las capas restantes. Generalmente, los suelos que la conforman son heterogéneos, por lo que requiere una evaluación exhaustiva de su calidad.

3.1.2. Subbase

La sub-base es una capa de material granular que puede estabilizarse con material de relleno. Además de disipar los esfuerzos transmitidos por capas superiores, la subbase es diseñada con el fin de drenar el agua de la estructura del pavimento. Se caracteriza por ser menos resistente que la base, pero más que sub-rasante; a razón de ello, funciona como una frontera entre ambas capas evitando que la base se contamine con material fino y además reduce los costos del pavimento al reducir el espesor de las capas superiores.

3.1.3. Base

Es la capa destinada fundamentalmente a disipar y transmitir las cargas originadas por el tránsito, a las capas subyacentes de la estructura del pavimento, además de ser sobre la cual se coloca la carpeta de rodadura. Generalmente, se conforma por una mezcla de grava con material de relleno. En consecuencia, es un elemento estructural tenaz, principalmente, porque la base resiste la mayor parte de los esfuerzos.

3.1.4. Carpeta de rodadura

Corresponde a capa superior del pavimento, generalmente, es construida de concreto bituminoso o concreto rígido. Proporciona la superficie de contacto para el vehículo, lo que permite la transmisión de esfuerzos a la estructura. Cumple la función de brindar confort, comodidad y seguridad a los usuarios,

además de proteger al resto de capas de la intemperie, lluvia, radiación, erosión, entre otros fenómenos naturales. Debido a que es artificial, es prácticamente homogénea en sentido longitudinal y transversal.

3.2. Especificaciones

La integración de las capas: subbase, base y carpeta de rodadura, colocadas sobre la subrasante, destinadas a sostener las cargas vehiculares, se denomina estructura del pavimento. En consecuencia, necesita el respaldo de algún diseño. El diseño estructural del pavimento y la respuesta de los materiales que conforman sus capas se encuentra más allá del alcance del presente trabajo. Sin embargo, se presentan las especificaciones que deben cumplir las capas de la base, subbase y subrasante.

En Guatemala, la Dirección General de Caminos es la entidad encargada de legislar las especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes, mediante un manual designado con el mismo nombre. En el presente sub título se abordarán dichas especificaciones solo por el nombre de manual.

3.2.1. Especificaciones de la subrasante

El Manual nos indica que: los suelos clasificados en el grupo A-8, de la norma AASHTO M 145, son altamente orgánicos, además de inadecuados para la construcción de subrasantes. Así mismo, no se permite que las rocas mayores a 100 mm se incorporen en los 300 mm superiores de dicha capa¹⁷. Sin embargo, se consideran como aptos los suelos con menos de tres por ciento de hinchamiento de acuerdo con el ensayo AASHTO T 193 o ASTM D-1883, ensayo

¹⁷ Dirección General de Caminos. Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes. p. 212.

de prueba estándar para California bearing ratio, también conocido como valor soporte o CBR.

3.2.2. Especificaciones de la subbase

La capa de subbase, generalmente, está constituida por materiales granulares en estado natural o estabilizados. De acuerdo con el manual la subbase puede tener un espesor variable por tramos, pero en ningún caso dicho espesor debe ser menor a 100 mm, ni mayor a 700 mm.¹⁸

El material empleado en la subbase, debe tener un valor mínimo de 30 de capacidad de valor soporte “CBR” conforme la norma AASHTO T 193 o ASTM D-1883, conteniendo una saturación del 95% de compactación de acuerdo con el ensayo Proctor, AASHTO 180 o ASTM D 1557. Además, debe cumplir con las especificaciones tabuladas a continuación:

Tabla XII. Especificaciones para capa de subbase

Tamaño máximo de las partículas	
Grava	< 70 mm
	< ½ espesor de la capa
Porcentaje de partículas que pasan el tamiz	
0,425 mm (tamiz 40)	< 50%
0,075 mm (tamiz 200)	< 25%
Límites de Attenberg	
Límite líquido	< 25
Índice de practicidad	< 6
Equivalente de arena (E.A.)	
E.A.	< 25

Fuente: DGC. *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes*, 2001.

¹⁸ Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. p. 218.

3.2.3. Especificaciones de la base

La capa de la base debe estar constituida por un material que conteniendo una saturación del 95% de compactación de acuerdo con el ensayo Proctor, AASHTO 180 o ASTM D 1557, sea capaz de brindar un valor mínimo de 70 de capacidad de valor soporte “CBR” conforme a la norma AASHTO T 193 o ASTM D-1883, y un hinchamiento máximo del 0,5%.

La graduación del material debe ser determinado por el método AASHTO T 27 o ASTM C136, el manual indica cuáles son los resultados del ensayo granulométrico, que debe cumplir un suelo para ser usado como subbase o base en una carretera, tal y como se indica a continuación:

Tabla XIII. Tipos de graduación para suelos de base o subbase

Estándar (mm)	Tamiz No.	Porcentaje por peso que pasa un tamiz de abertura cuadrada (AASHTO T 27)					
		Tipo “A” (Sub-base) 50 mm (2”) máximo	Tipo “A” (Base) 50 mm (2”) máximo		Tipo “B” (Sub-Base y Base) 38.1 mm (1½”) máx.		Tipo “C” (Sub-Base y Base) 25 mm (1”) máximo
		A-1	A-1	A-2	B-1	B-2	C-1
50.0	2”	100	100	100			
38.1	1 ½”	-	-	-	100	100	
25.0	1”	60-90	65-95	60-85	-	-	100
19.0	¾”	-	-	-	60-90	-	-
9.50	⅜”	-	-	-	-	-	50-85
4.75	Nº 4	20-60	25-60	20-50	30-60	20-50	35-65
2.00	Nº 10	-	-	-	-	-	25-50
0.425	Nº 40	-	-	-	-	-	12-30
0.075	Nº 200	3-12	3-12	3-10	5-15	3-10	5-15

Fuente: DGC. *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes*, 2001.

Adicionalmente, el manual indica especificaciones que el material debe cumplir para ser empleado como base o sub-base: el porcentaje que pasa el tamiz 0.075 mm (Nº 200), debe ser menor que la mitad del porcentaje que pasa el tamiz 0.425 mm (Nº 40).¹⁹ Así mismo, debe cumplir con las especificaciones tabuladas a continuación:

Tabla XIV. **Especificaciones para capa de base o subbase**

Porcentaje de partículas que pasan el tamiz	
0,075 mm (tamiz 200) < (50%) 0,425 mm (tamiz 40)	
Límites de Attenberg	
Límite líquido	< 25
Índice de practicidad	< 6
Equivalente de arena (E.A.)	
E.A.	< 30

Fuente: DGC. *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes*, 2001.

3.2.4. **Especificaciones de la carpeta de rodadura**

La carpeta de rodadura está constituida por una mezcla de material pétreo y material bituminoso. El material bituminoso; compuesto por cemento y emulsión, deben cumplir con los requisitos solicitados por la dirección general de caminos y los cuales fueron tabulados en las siguientes tablas.

¹⁹ Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. p. 224.

Tabla XV. **Especificaciones para material bituminoso: cemento**

Tipo y grado del material bituminoso	Especificación AASHTO	Temperatura de aplicación en °C
Cementos asfálticos		
Graduación por viscosidad: <ul style="list-style-type: none"> • AC-2.5 • AC-5 	AASHTO M 226	>130
Graduación por viscosidad: <ul style="list-style-type: none"> • AC-2.5 • AC-5 	AASHTO M 20	>140
		>130
		>130

Fuente: DGC. *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes*, 2001.

Tabla XVI. **Especificaciones para material bituminoso: emulsiones**

Tipo y grado del material bituminoso	Especificación AASHTO	Temperatura de aplicación en °C
Emulsiones asfálticas		
Aniónicas: <ul style="list-style-type: none"> • RS-1 • RS-2 • MS-1 • HFMS-1 	AASHTO M 140	20-60
		50-85
		20-70
		20-70
Catiónicas: <ul style="list-style-type: none"> • AC-2.5 • AC-5 	AASHTO M 208	50-85
		50-85

Fuente: DGC. *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes*, 2001.

Además de cumplir con los requisitos en sus materiales constitutivos, la mezcla asfáltica deberá cumplir lo establecido según el método de diseño

utilizado, siendo el más común el ensayo Marshall²⁰. El ensayo de estabilidad Marshall para mezclas con asfaltos líquidos; es estandarizada bajo la normal ASTM D 1559 o AASHTO T 245, dicho ensayo también está normado en el manual MS-14 del Instituto de Asfalto para mezclas con emulsión.

La Dirección General de Caminos establece los parámetros mínimos y máximos, que deberá cumplir una mezcla asfáltica para ser considerada segura y estructuralmente apropiada en el diseño y construcción de la infraestructura vial de Guatemala.

Tabla XVII. **Especificaciones para material bituminoso: cemento**

Método de diseño Marshall	Valores límites	
	<u>Mínimo</u>	<u>Máximo</u>
AASHTO T 245, ASTM D 1559 y MS-14		
<ul style="list-style-type: none"> • Numero de golpes de compactación en cada extremo del espécimen. <ul style="list-style-type: none"> 1. Con emulsión asfáltica 2. Con asfaltos líquidos • Estabilidad de acuerdo con el uso de la mezcla <ul style="list-style-type: none"> 1. Para bacheo 2. Para pavimentación • Fluencia en 0,25 mm (0.01 pulgada) • Relación estabilidad/fuerza (lb/0,01 pulg) • Porcentaje de vacíos con aire en la mezcla compactada • Sensibilidad a la humedad AASHTO T 283 Resistencia retenida <ul style="list-style-type: none"> 1. Con emulsión asfáltica 2. Con asfaltos líquidos • Porcentaje de vacíos relleno con asfalto 	50 75 500 lbf 750 lbf 8 120 3 50% 75% 65	75 75 16 225 15

Fuente: DGC. *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes*, 2001.

²⁰ Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. p. 302.

3.3. Ensayos de evaluación *in situ*

En la construcción de pavimento, es necesario realizar estudios para determinar la calidad del suelo. Generalmente, el ensayo de densidad de campo es el único factor aprobatorio de la calidad de las capas del pavimento, pero este ensayo no se relaciona con los parámetros bajo los cuales se caracterizan las capas en el diseño.

Con el fin de lograr un mejor control de calidad del pavimento durante su construcción, es necesario realizar otras metodologías de evaluación *in situ*. A continuación, presentamos un sucinto de algunos de los ensayos de evaluación *in situ* para pavimentos.

3.3.1. Humedad de campo

La compactación de la capa de subbase o base es uno de los aspectos más importantes en la construcción de carreteras. El manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes, indica que el material debe ser humedecido previo a su compactación para obtener su densidad óptima. Esa humedad es conocida como humedad de campo; y se debe determinar secando el material o por el método con gas de carburo de calcio ensayado en cámara de humedad a presión, según lo indica la norma AASHTO T 217.

3.3.2. Calicatas

Las calicatas son pozos a cielo abierto, con profundidad variable desde la rasante hasta la subrasante. Permiten determinar el espesor de las capas

constitutivas del pavimento, el estado físico de cada capa y el comportamiento mecánico de los suelos que conforman su estructura.

La determinación de los espesores y el estado físico de las capas, es realizado mediante una inspección visual en el lugar. Por el contrario, la evaluación mecánica del suelo es realizada en un laboratorio, con las muestras de cada capa extraída del pozo.

3.3.3. Deflectómetro

El deflectómetro de impacto liviano, LWD por sus siglas en inglés, es un equipo utilizado para el control de calidad de la sub-rasante, sub-base, base y capas delgadas de pavimento. Mediante el cual se determina el módulo de resiliencia de las capas que constituyen la estructura del pavimento.

El método de ensayo con deflectómetro es aplicable a rutas pavimentadas y caminos de terracería. El procedimiento consiste en medir las deflexiones por medio de un LWD; según lo indica la norma ASTM E 2583. Posteriormente, es necesario determinar la rigidez de la envolvente del pavimento mediante la utilización de software o técnicas de análisis y cálculo.²¹

3.4. Ensayos de laboratorio

Los ensayos de laboratorio son el medio para determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo, ya que proporcionan los datos necesarios para predecir su comportamiento. En la rama de la ingeniería vial, los ensayos son

²¹ UCR. Laboratorio Nacional de Materiales y modelos estructuras. *Método de ensayo para la determinación de deflexiones haciendo uso de un deflectómetro de impacto portable*. <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/sitio-nuevo/images/ensayos/11-campo/11.26.pdf>. Consulta: 12 de septiembre de 2017

importantes para determinar los espesores de las capas del pavimento, y para estimar las causas que provocan el deterioro de este, así como las razones que provocan las fallas prematuras.

En seguida, se presenta una descripción sucinta de los ensayos de laboratorio para suelos, los cuales se enfocaron en el control de calidad y el diseño de pavimentos.

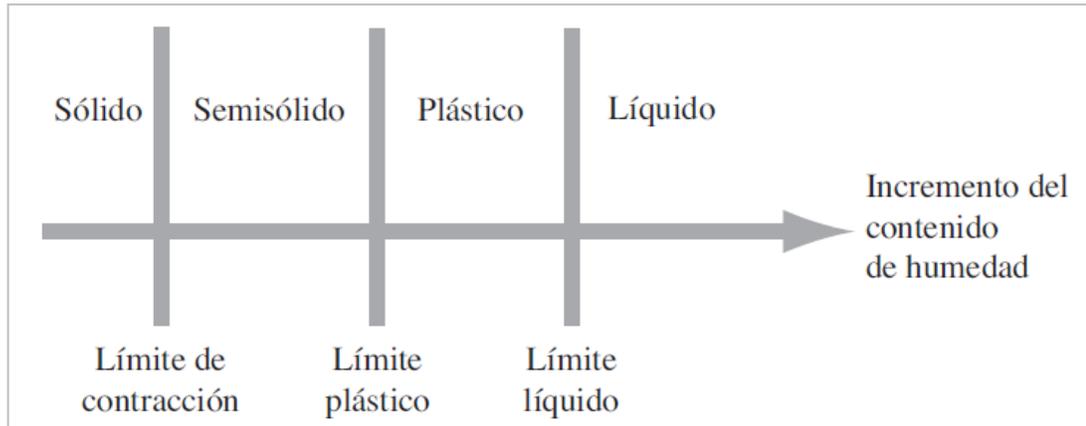
3.4.1. Límites de Atterberg

La consistencia de un suelo de grano fino puede ser dividida en cuatro estados básicos: sólido, semisólido, plástico y líquido, debido a que el contenido de humedad afecta su comportamiento. Esta naturaleza de los suelos se debe al agua absorbida por las partículas de arcilla.

La teoría citada fue presentada por el científico sueco Albert Mauritz Atterberg, la cual desarrolló un método para describir los estados de consistencia de los suelos de grano fino con diferentes contenidos de humedad. El contenido de humedad en la transición del estado sólido al estado líquido se define como el límite de contracción. El porcentaje de humedad en la transición del estado semisólido al estado plástico se define como el límite plástico y del estado plástico al estado líquido se define como el límite líquido. Estos tres límites los definió en su método como Límites de Atterberg.²²

²² DAS. Braja. *Fundamentos de la ingeniería de geotecnia*. p. 64.

Figura 18. Límites de Atterberg



Fuente: DAS. Braja. *Fundamentos de la ingeniería de geotecnia*, 2013.

Aun cuando los límites fueron creados por Albert Atterberg, el procedimiento para su cálculo fue refinado por Arthur Casagrande. En la actualidad, el método para determinar los límites de Atterberg se encuentra estandarizado bajo las normas AASTHO T 90 o ASTM D 4318.

Los límites líquido y plástico se determinan por pruebas de laboratorio relativamente sencillas. Mientras que el índice de plasticidad se calcula como la diferencia de los dos límites antes mencionados.

3.4.2. Granulometría

El análisis granulométrico o granulometría, es el procedimiento manual o mecánico, de separar las partículas constitutivas del suelo, de acuerdo con un rango determinado de tamaños. Es estandarizado bajo la norma AASTHO T 27 o ASTM C 136.

Tabla XVIII. **Especificaciones para capa de base o subbase**

Nombre la organización	Tamaño de grano (mm)			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT)	>2	2 a 0,06	0,06 a 0,002	<0,002
Departamento de Agricultura de E.U. (USDA)	>2	2 a 0,05	0,075 a 0,002	<0,002
AASHTO	76,2 a 2	2 a 0,075	0,075 a 0,002	<0,002
Sistema unificado de clasificación de suelos (ASTM)	76,2 a 2	4,75 a 0,075		

Fuente: DAS. Braja. *Fundamentos de la ingeniería de geotecnia*, 2013.

Los tamaños de las partículas que conforman el suelo son importantes debido a que establecen una correlación indirecta con sus propiedades mecánicas, además que los suelos son nombrados dependiendo del tamaño predominante de sus partículas. La tabla XV ejemplifica los distintos límites de separación de tamaño de suelo en gravas, arenas, limos y arcillas.²³

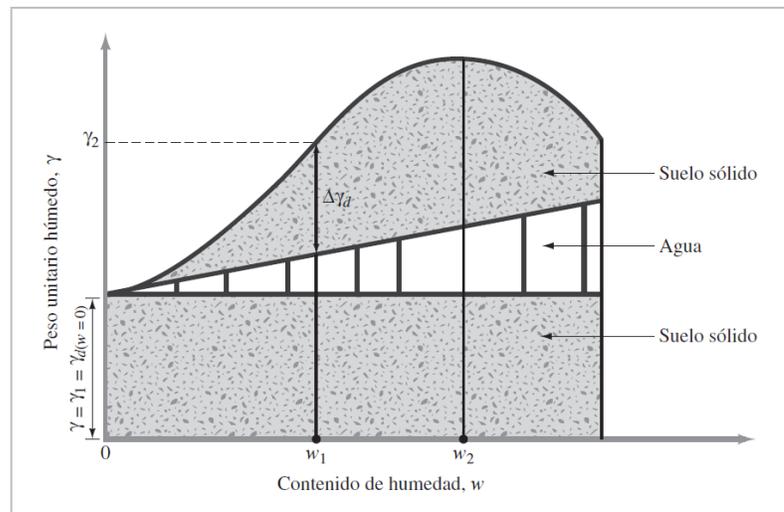
3.4.3. Compactación Proctor

La compactación es un proceso artificial a través del cual la masa de suelo reduce su relación de vacíos. Así mismo, magnifica las propiedades mecánicas del suelo, lo que incrementa su capacidad de soportar carga. En términos generales, la compactación es la acción de reducir los vacíos en una masa de suelo aplicando energía mecánica.

²³ DAS. Braja. *Fundamentos de la ingeniería de geotecnia*. p. 65.

La compactación de un suelo varía conforme a su contenido de humedad. Por tal razón el porcentaje de compactación se mide en términos de su peso unitario seco.²⁴ El peso unitario seco, aumenta de acuerdo con su contenido de humedad. Se considera una humedad inicial cero, hasta un valor máximo y luego disminuye a medida que la humedad aumenta, como se muestra en la figura 19.

Figura 19. **Compactación de suelos según su contenido de humedad**



Fuente: DAS. Braja. *Fundamentos de la ingeniería de geotecnia*, 2013.

El contenido de humedad en el que se alcanza el peso unitario seco máximo se denomina humedad óptima. El ensayo de laboratorio para determinar el peso unitario máximo seco y el contenido de humedad óptima se denominada: prueba de compactación Proctor, en honor al ingeniero Ralph R. Proctor, y se encuentra estandarizada bajo la norma ASTM D 1557 y AASHTO T 180.

²⁴ DAS. Braja. *Fundamentos de la ingeniería de geotecnia*. p. 92.

3.4.4. California bearing ratio (CBR)

La finalidad del ensayo es determinar la capacidad de valor soporte, CBR, de un suelo compactado con su humedad óptima. El método para realizar el ensayo fue desarrollado por la división de carreteras de Estados Unidos y es estandarizado por las normas ASTM D 1883 y AASHTO T 193.

El ensayo de California bearing ratio mide la resistencia al corte de un suelo, permitiendo obtener un (%) de la relación de valor soporte con un suelo patrón. El valor soporte del suelo está definido como la fuerza requerida para que un pistón normalizado penetre a una profundidad determinada, una muestra previamente compactada, expresando así la fuerza necesaria de penetración como un porcentaje de la fuerza para penetrar un suelo estandarizado.

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En el área de ingeniería geotécnica, el mejoramiento del suelo también es denominado estabilización del suelo. Este es un proceso de modificación de las características físicas y propiedades mecánicas, realizado *in situ*. Existen diversas técnicas para modificar el suelo, sin embargo, es posible dividir las en dos categorías principales: mecánica y química.

La estabilización química se basa en la aplicación de aditivos para mejorar el comportamiento del suelo. El objetivo de esta técnica es reducir la plasticidad y el potencial de expansión y contracción. Los materiales más utilizados en dicho proceso son: el cemento, la cal y las cenizas volantes.

La estabilización mecánica involucra técnicas que mejoran las propiedades del suelo, sin la adición de agentes u otras sustancias estabilizadoras. En otras palabras, no hay reacciones químicas. Las técnicas más utilizadas en dicho procedimiento son: compactación, drenes de arena y precarga.²⁵

Basados en la teoría antes mencionada y con el objetivo de determinar una posible solución al problema planteado en el subtítulo 1.4. El desarrollo experimental consistió en analizar la variación de las características físicas y las propiedades mecánicas de un suelo tipo C-1, al ser estabilizado con diferentes dosificaciones de cemento, cal hidratada, emulsión asfáltica catiónica de rótula lenta y concreto asfáltico reciclado. Mientras que la técnica mecánica utilizada fue la compactación.

²⁵ DAS. Braja. *Fundamentos de la ingeniería de geotecnia*. p. 111.

4.1. Materiales: agentes estabilizadores

Los materiales utilizados durante el desarrollo experimental fueron:

4.1.1. Cemento hidráulico

Los cementos, al fraguar e hidratarse los silicatos y aluminatos cálcicos anhidros, producen uniones entre las partículas del suelo, disminuyendo su sensibilidad al agua y, en función del contenido de conglomerante, pueden aumentar considerablemente la resistencia a la deformación del suelo estabilizado y ofrecer una cierta resistencia a la tracción.

4.1.2. Cal hidratada

La cal, al mezclarse con el suelo, reacciona con las partículas finas generando un proceso de floculación mediante un intercambio iónico y formando grumos friables. La cal se emplea para reducir rápidamente la plasticidad del suelo y su hinchamiento, además mejorar su compactibilidad y aumenta su capacidad de soporte.

4.1.3. Concreto asfáltico reciclado

El concreto asfáltico reciclado, también conocido como RAP por su definición en inglés. Es el resultado de la demolición controlada de una carpeta de rodadura, obteniéndose partículas de agregado grueso y/o fino compuestas de asfalto que posee cierto grado de envejecimiento. El agregado obtenido en este proceso puede mejorar la capacidad de soporte del suelo, debido a que es considerado grava artificial. Para el desarrollo experimental fue utilizado RAP, con granulometría entre 3/8 plg y 1 plg.

4.1.4. Emulsión asfáltica catiónica de rótula lenta

Las emulsiones asfálticas pueden ser clasificadas en tres tipos de acuerdo con su sustancia emulgente: aniónicas, iónicas y catiónicas, las últimas fueron las utilizadas durante el desarrollo experimental. La emulsión asfáltica catiónica es confiere una polaridad positiva a los glóbulos de asfalto. Así mismo, cualesquiera de dichas emulsiones son clasificadas de acuerdo con su velocidad de reacción con el agregado en rótula rápida, media y lenta. La ficha técnica de la emulsión utilizada se especifica en el anexo dos.

El objetivo de agregar una emulsión a las capas del suelo que conforman el pavimento es redistribuir sus partículas en forma de película continua, envolviendo parcial o totalmente el componente mineral, en un proceso denominado floculación del suelo. Este fenómeno químico ayuda a lograr que este material alcance una resistencia, disminuya su capacidad de absorción y aumentando su cohesión.

4.2. Equipo de laboratorio

La clasificación y el análisis del suelo seleccionado es posible gracias a los ensayos realizados en un laboratorio. Existen diversas pruebas que pueden ser aplicadas a un suelo, las cuales varían de acuerdo con las necesidades que el suelo debe cumplir. En Guatemala, la Dirección General de Caminos define las especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes, volviendo necesarios los siguientes ensayos: compactación Proctor, prueba estándar para California bearing ratio, límites de Atterberg y análisis granulométrico o granulometría. Los cuatro ensayos antes mencionados están normalizados por las instituciones AASHTO y ASTM, como fue mencionado en el capítulo anterior.

La precisión en los resultados de los ensayos de laboratorio no solamente depende del seguimiento estricto de los pasos recomendados por las normas existentes, sino también de la calidad y buen estado de los equipos que se utilicen en el proceso.

En el ensayo de límites de Atterberg, fue utilizado el equipo de laboratorio enlistado a continuación.

- Copa de Casagrande.
- Ranurador, combinación de acanalador y calibre; con borde contrario al acanalador de 1 cm².
- Tamiz No. 40.
- Cazuela de porcelana y apisonador.
- Recipientes para muestra de contenido de humedad.
- Balanza con precisión de 0.01 g.
- Espátula con hoja flexible de aproximadamente 75 mm de largo y 20 mm de ancho.
- Probeta con una capacidad de 25 cm³.
- Horno capaz de mantener temperatura constante de 105 °C.

En el ensayo de granulometría, fue utilizado el equipo de laboratorio enlistado a continuación.

- Juego de tamices (2", 3/4", núm. 4, núm. 10, núm. 40, núm. 200 y fondo); de arriba hacia abajo en ese orden.
- Máquina tamizadora.
- Balanza.
- Cepillo.

En el ensayo de compactación Proctor modificado, fue utilizado el equipo de laboratorio enlistado a continuación

- Tamiz núm. 4.
- Espátula.
- Tarros para muestra.
- Probeta.
- Piceta.
- Tara de compactación.
- Martillo Proctor de 10lbs.
- Brocha.
- Razador.
- Cucharón.
- Triturador.

En la realización del ensayo de compactación Proctor modificado, se utilizó el equipo de laboratorio enlistado a continuación:

- Prensa con capacidad por lo menos de 10,000 lb, equipada con cabezal o base móvil que avance a razón de 0,05 plg/min.
- Pistón de penetración metálico, de 1,92 plg de diámetro (3 plg² de área) y no menos de 4 plg de longitud.
- Micrómetro de reloj, con sensibilidad legible 0,001 plg para medir penetración.
- 3 moldes cilindros metálicos de diámetro interno de 6 plg y con una altura de 7 plg, provistos de collar de extensión de 2 plg de altura y una plancha de base perforada de 3/8 plg de espesor.
- 3 discos separadores de 5,93 plg de diámetro y 2,42 plg de espesor.
- Aparato para medir la expansión.

- Sobrecargas, una metálica anular y varias metálicas ranuradas de 5 lb de peso cada una, 5-5/8 plg de diámetro externo y 2-1/8 plg de diámetro interno.
- Martillo Proctor de 10 lbs.
- Balanza con capacidad de 100 kg.
- Horno capaz de mantener temperatura constante de 105 °C.
- Bandeja para mezcla, tanque de inmersión, papel filtro, cucharones, balanzas, tarros para medición de humedades y cronómetro.

4.3. Ensayos de clasificación del suelo

La clasificación del suelo de acuerdo con el análisis granulométrico fue especificada en la tabla XIII, “tipos de graduación para suelos de base o sub-base”. Así mismo, los parámetros dentro de los cuales deben estar los límites de consistencia son los delimitados en la tabla XIV, “especiaciones para capa de base o sub-base”.

4.3.1. Límites de Atterberg

Los resultados para el límite líquido y límite plástico del suelo ensayado, fue de cero en ambos casos, por lo tanto, el índice de plasticidad del suelo también es cero. A continuación, se tabularon los datos obtenidos:

Tabla XIX. **Resultados de los límites de Atterberg**

Límites de Atterberg	
Límite líquido	0
Índice de plasticidad	0

Fuente: elaboración propia.

4.3.2. Granulometría

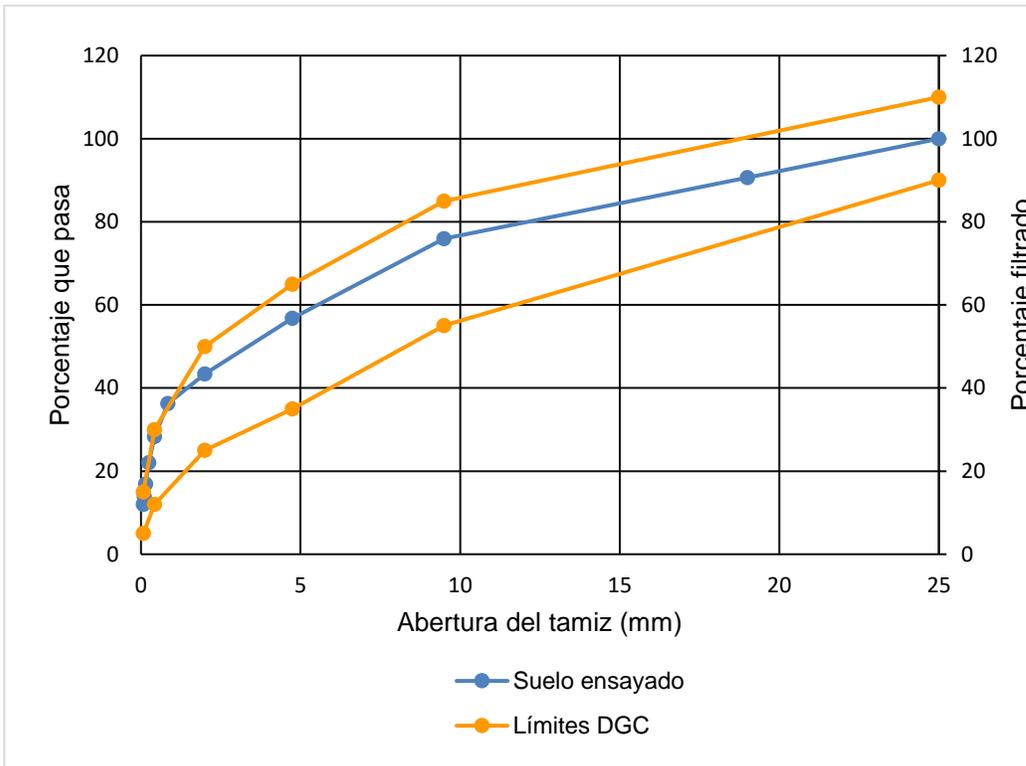
Los resultados del análisis granulométrico verificaron que el suelo cumpliera las especificaciones de la dirección general de caminos, para un material utilizado como base o sub-base tipo C-1. Los datos obtenidos fueron tabulados, graficados y comparados, como se muestra a continuación.

Tabla XX. **Resultados del análisis granulométrico**

Tamiz	Abertura	Peso bruto (gr.)	Tara (gr.)	Peso neto (gr.)	Porcentaje filtrado
		2205,59	162,49	2043,10	100,00
3"	75 mm	2205,59	162,49	2043,10	100,00
2"	50 mm	2205,59	162,49	2043,10	100,00
1 1/2"	37,5 mm	2205,59	162,49	2043,10	100,00
1"	25 mm	2205,59	162,49	2043,10	100,00
3/4"	19,0 mm	1987,90	162,49	1825,41	90,63
3/8"	9,5 mm	1647,27	162,49	1484,78	75,96
4	4,75 mm	1201,87	162,49	1039,38	56,78
10	2,00 mm	890,54	162,49	728,05	43,37
20	850 µm	725,31	162,49	562,82	36,26
40	425 µm	540,51	162,49	378,02	28,30
60	250 µm	394,60	162,49	232,11	22,01
100	150 µm	275,31	162,49	112,82	16,88
140	106 µm	205,45	162,49	42,96	13,87
200	75 µm	-	162,49	279,10	12,02

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. Comparación gráfica del análisis granulométrico



Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, el manual indica que el porcentaje que pasa el tamiz 0,075 mm (Nº 200) “12,02%”, debe ser menor que la mitad del porcentaje que pasa el tamiz 0,425 mm (Nº 40) “28,3%”.

Tabla XXI. Especificaciones para capa de base o subbase

Porcentaje de partículas que pasan el tamiz Nº 200
12,02 < 14,15

Fuente: elaboración propia.

4.4. Ensayos de propiedades mecánicas del suelo

La caracterización de las propiedades mecánicas de un suelo utilizado en el diseño de carreteras se realiza por medio de la prueba estándar para California bearing ratio, denominada también CBR. El ensayo de CBR tiene por objetivo determinar la resistencia a la penetración del suelo bajo condiciones de humedad y densidad óptimas, las dos propiedades mencionadas son determinadas mediante el ensayo de compactación Proctor.

4.4.1. Compactación Proctor

La teoría de Proctor indica que “el peso unitario seco varía de manera parabólica con respecto al porcentaje de humedad presente en la compactación”.²⁶ Por lo tanto, el objetivo es determinar el peso unitario seco máximo del suelo. Los resultados del ensayo Proctor fueron tabulados y graficados, como se muestra a continuación:

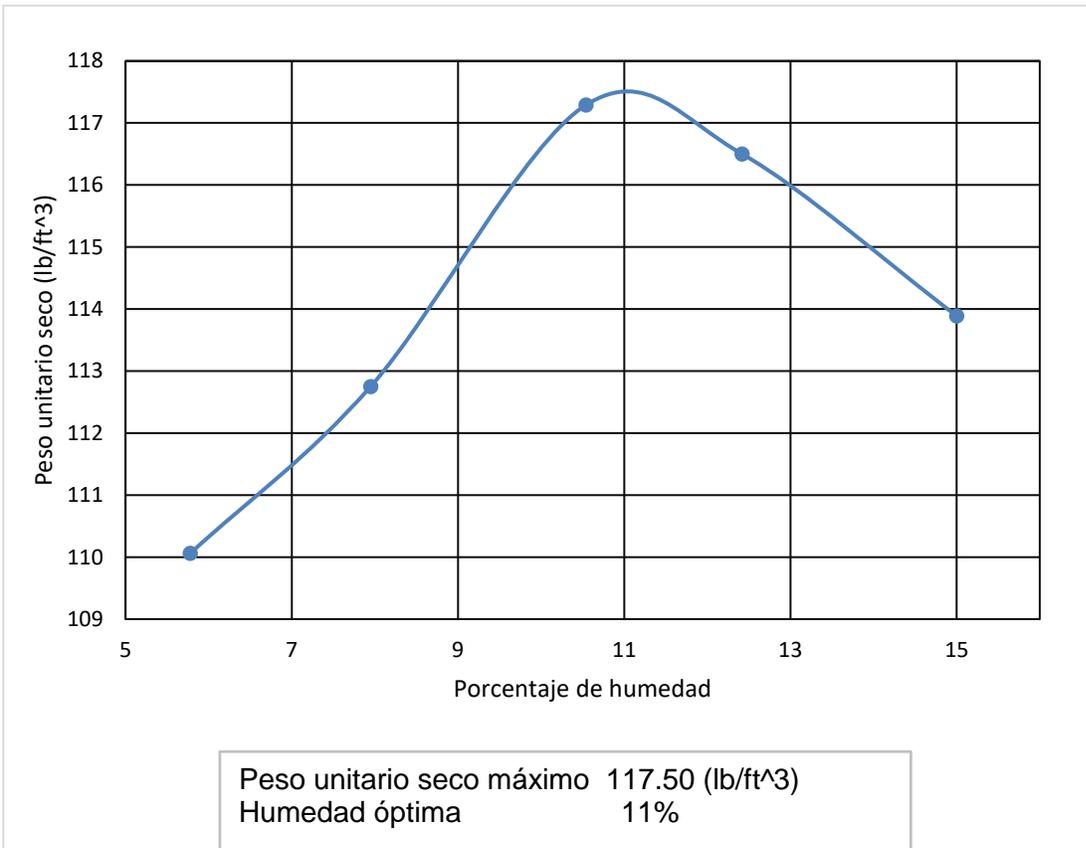
Tabla XXII. Resultados del ensayo de compactación Proctor

Probeta no.	1	2	3	4	5
Peso bruto húmedo (lb/ft ³)	5,92	6	6,12	6,14	6,14
Tara (lb)	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16
Peso neto húmedo (lb/ft ³)	1,76	1,84	1,96	1,98	1,98
Peso unitario húmedo (lb/ft ³)	116,42	121,72	129,65	130,98	130,98
% de humedad	5,78	7,95	10,54	12,42	15,00
Peso unitario seco (lb/ft ³)	110,06	112,75	117,29	116,50	113,89

Fuente: elaboración propia.

²⁶ DAS. Braja. *Fundamentos de la ingeniería de geotecnia*. p. 92.

Figura 21. Comparación gráfica densidad seca-humedad



Fuente: elaboración propia.

4.4.2. Prueba estándar para California bearing ratio

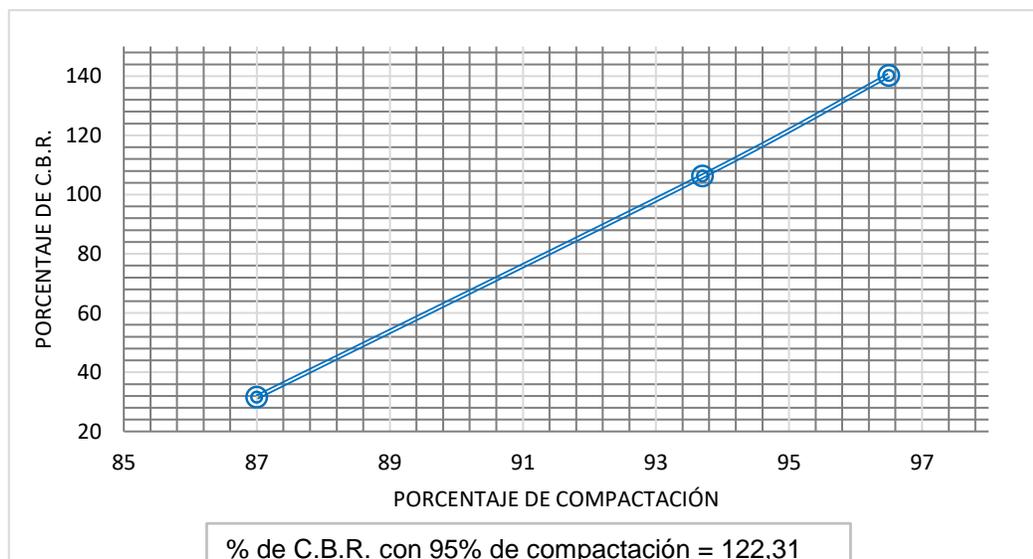
La prueba California bearing ratio abreviada como CBR, es un método de ensayo el cual mide la resistencia a la penetración del suelo, determinando así la capacidad del material para ser utilizado como base o sub-base. Los resultados ratio fueron tabulados y graficados, como se muestra a continuación:

Tabla XXIII. Resultados del ensayo de CBR

No. de Golpes	65	30	15
Peso bruto húmedo (lb/ft ³)	11,42	11,34	11,10
Tara (lb)	7,14	7,18	7,24
Peso neto húmedo (lb/ft ³)	4,28	4,16	3,86
Volumen (ft ³)	0,075	0,075	0,075
Peso unitario húmedo (lb/ft ³)	125,80	122,27	113,46
% de humedad	11,00	11,00	11,00
Peso unitario seco (lb/ft ³)	113,3	110,16	102,21
% de expansión	0,26	0,28	0,46
% de compactación	96,5	93,7	87,0
% de CBR	140,29	106,24	31,60

Fuente: elaboración propia.

Figura 22. Comparación % de CBR - % de compactación



Fuente: elaboración propia.

4.5. Dosificación con cemento hidráulico, cal hidratada, concreto asfáltico reciclado y emulsión asfáltica

El suelo debe ser mezclado con las cantidades adecuadas de agentes estabilizadores, para tener un rendimiento óptimo. Se considera como óptima la dosificación que aumente de manera considerable las propiedades mecánicas del suelo, utilizando la menor cantidad de materiales. En consecuencia, es necesario realizar diversas proporciones de cemento, cal hidratada, concreto asfáltico y emulsión asfáltica, para así determinar las mejores condiciones.

La determinación de las proporciones a utilizar en la dosificación es un proceso largo e iterativo, además de existir diversos métodos para establecer el rango óptimo de la mezcla. No obstante, y para facilitar el trabajo en campo, el método utilizado fue realizar pruebas de laboratorio con diferentes porcentajes en peso de los agentes estabilizadores con respecto a la muestra de suelo, como se muestra en la figura XVII, aumentando a intervalos constantes los materiales utilizados. Las proporciones utilizadas fueron tabuladas en la tabla que se muestra a continuación.

Tabla XXIV. Dosificaciones con agentes estabilizadores

Estabilización No.	1	2	3
Porcentaje de cemento	1%	1.5%	2%
Porcentaje de cal	1,5%	2,5%	3,5%
Porcentaje de concreto asfáltico reciclado	4%	5%	6%
Porcentaje de emulsión asfáltica	4%	5%	6%

Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Dosificación de una muestra de suelo con agentes estabilizadores**



Fuente: Centro de Investigaciones, Laboratorio de Mecánica de Suelos. Facultad de Ingeniería.

4.6. Datos obtenidos

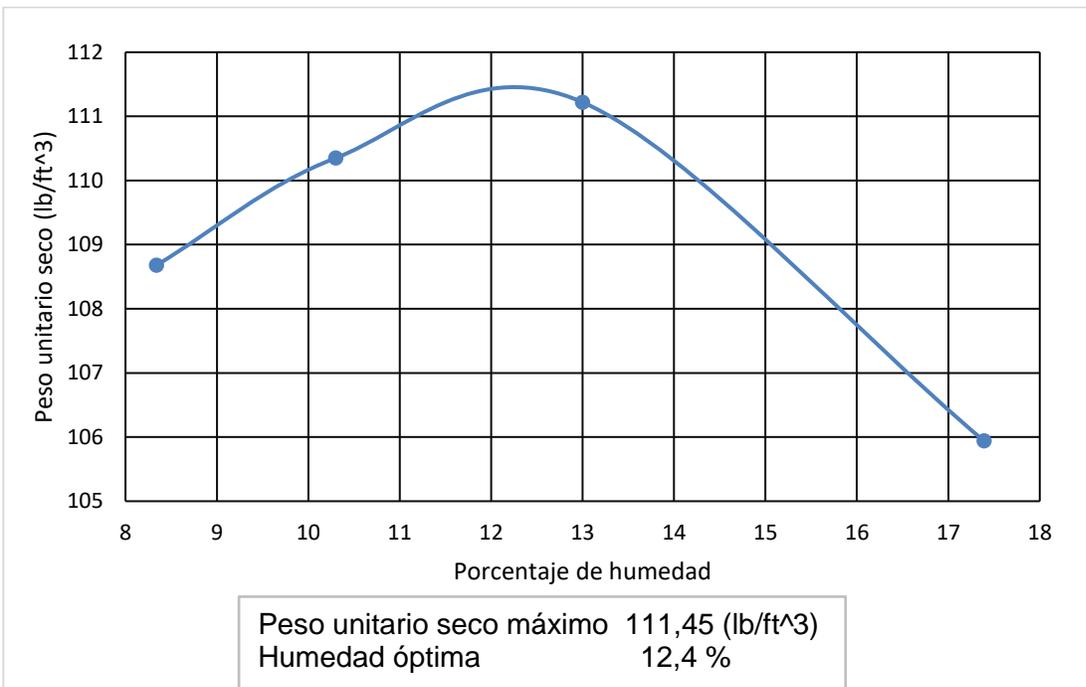
Los resultados de las pruebas de compactación Proctor y los resultados de los ensayos de prueba estándar California bearing ratio, para las dosificaciones indicadas en la tabla XXI, fueron tabulados y graficados, como se muestra a continuación

Tabla XXV. **Resultados del ensayo de compactación Proctor, estabilización número 1**

Probeta no.	1	2	3	4
Peso bruto húmedo (lb/ft ³)	5,96	6,02	6,08	6,06
Tara (lb)	4,18	4,18	4,18	4,18
Peso neto húmedo (lb/ft ³)	1,78	1,84	1,9	1,88
Peso unitario húmedo (lb/ft ³)	117,75	121,72	125,69	124,36
% de humedad	8,34	10,30	13,00	17,39
Peso unitario seco (lb/ft ³)	108,68	110,35	111,22	105,94

Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Comparación gráfica densidad seca-humedad, estabilización número 1**



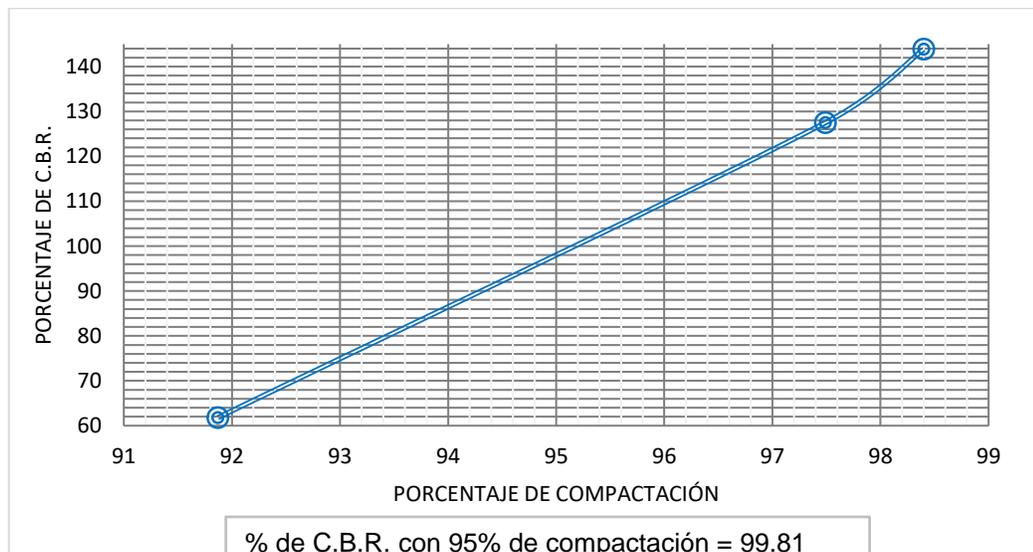
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Resultados del ensayo de CBR - estabilización número 1**

No. de Golpes	65	30	15
Peso bruto húmedo (lb/ft ³)	11,38	11,40	11,14
Tara (lb)	7,18	7,24	7,22
Peso neto húmedo (lb/ft ³)	4,2	4,16	3,92
Volumen (ft ³)	0,075	0,075	0,075
Peso unitario húmedo (lb/ft ³)	123,45	122,27	115,22
% de humedad	12,53	12,53	12,53
Peso unitario seco (lb/ft ³)	109,7	108,66	102,39
% de expansión	0,02	0,04	0,07
% de compactación	98,4	97,49	91,87
% de CBR	143,87	127,49	61,80

Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Comparación % de CBR - % de compactación, estabilización número 1**



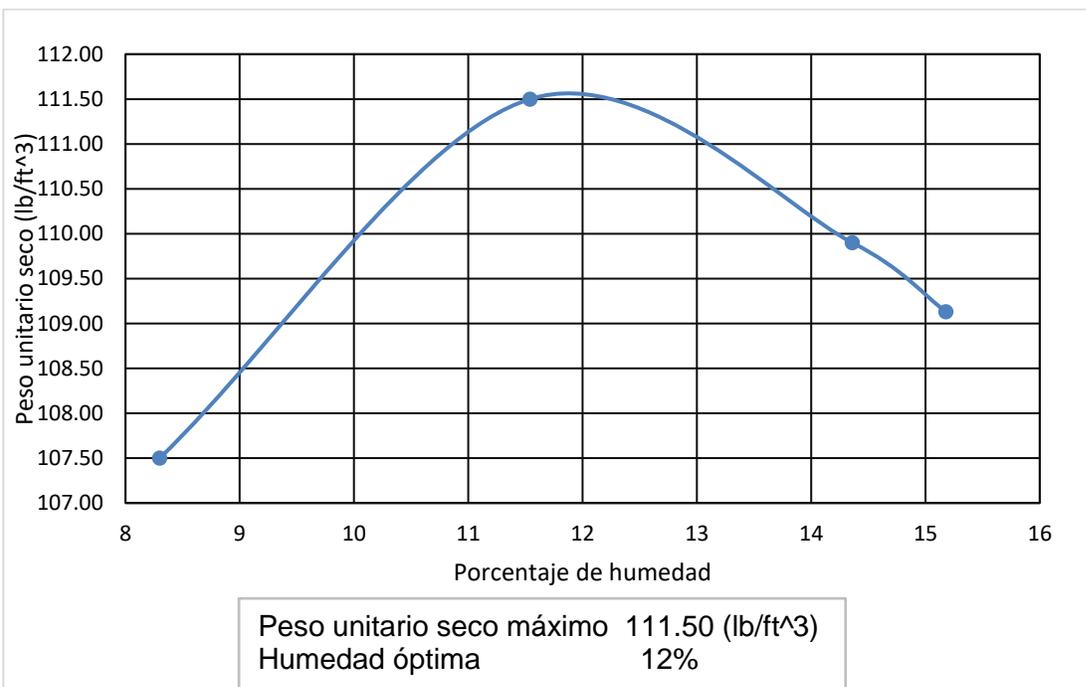
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Resultados del ensayo de compactación Proctor, estabilización número 2**

Probeta no.	1	2	3	4
Peso bruto húmedo (lb/ft ³)	5,94	6,06	6,08	6,08
Tara (lb)	4,18	4,18	4,18	4,18
Peso neto húmedo (lb/ft ³)	1,76	1,88	1,9	1,9
Peso unitario húmedo (lb/ft ³)	116,42	124,36	125,69	125,69
% de humedad	8,30	11,54	14,36	15,18
Peso unitario seco (lb/ft ³)	107,50	111,50	109,90	109,13

Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Comparación gráfica densidad seca-humedad, estabilización número 2**



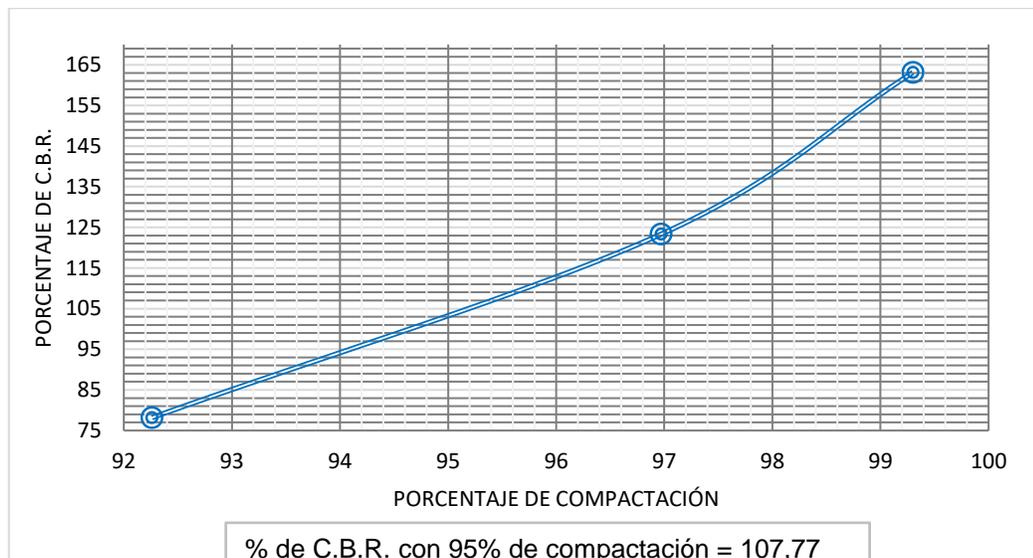
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Resultados del ensayo de CBR - estabilización número 2**

No. de Golpes	65	30	15
Peso bruto húmedo (lb/ft ³)	12,44	12,32	11,06
Tara (lb)	8,22	8,20	7,14
Peso neto húmedo (lb/ft ³)	4,22	4,12	3,92
Volumen (ft ³)	0,075	0,075	0,075
Peso unitario húmedo (lb/ft ³)	124,04	121,10	115,22
% de humedad	12,00	12,00	12,00
Peso unitario seco (lb/ft ³)	110,7	108,12	102,87
% de expansión	0,00	0,00	0,02
% de compactación	99,3	96,97	92,26
% de CBR	163,13	123,31	78,17

Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Comparación % de CBR - % de compactación, estabilización número 2**



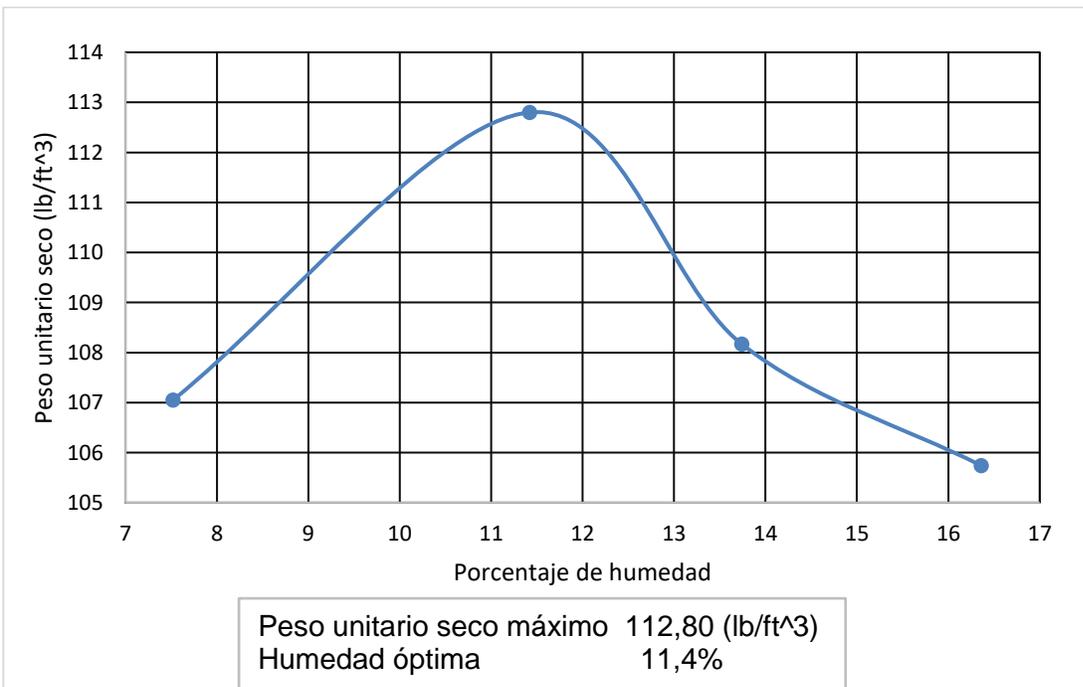
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Resultados del ensayo de compactación Proctor, estabilización número 3**

Probeta no.	1	2	3	4
Peso bruto húmedo (lb/ft ³)	5,92	6,08	6,04	6,04
Tara (lb)	4,18	4,18	4,18	4,18
Peso neto húmedo (lb/ft ³)	1,74	1,9	1,86	1,86
Peso unitario húmedo (lb/ft ³)	115,10	125,69	123,04	123,04
% de humedad	7,52	11,42	13,74	16,36
Peso unitario seco (lb/ft ³)	107,05	112,80	108,17	105,74

Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Comparación gráfica densidad seca-humedad, estabilización número 3**



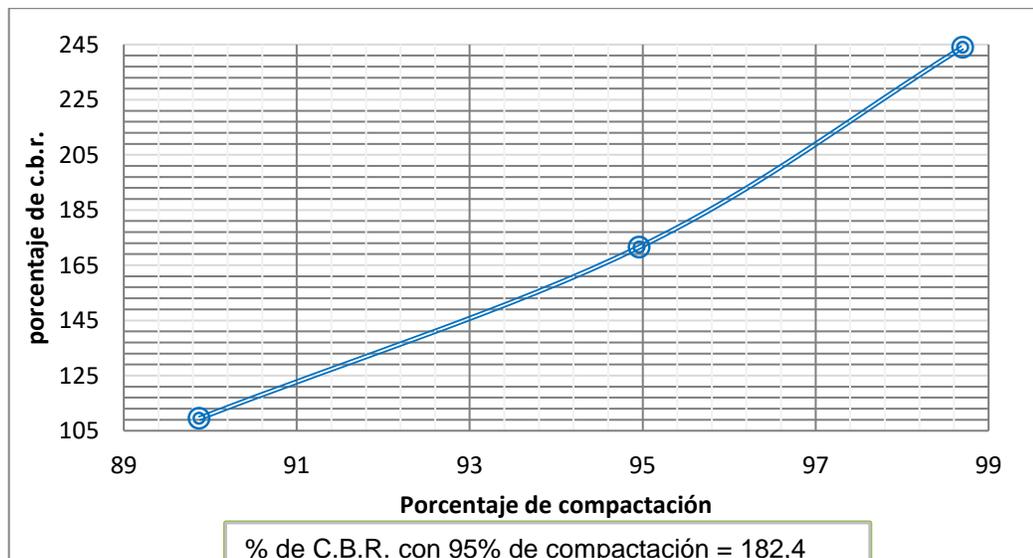
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Resultados del ensayo de CBR - estabilización número 3**

No. de Golpes	65	30	15
Peso bruto húmedo (lb/ft ³)	12,48	11,24	12,08
Tara (lb)	8,22	7,14	8,20
Peso neto húmedo (lb/ft ³)	4,26	4,10	3,88
Volumen (ft ³)	0,075	0,075	0,075
Peso unitario húmedo (lb/ft ³)	125,21	120,51	114,04
% de humedad	12,50	12,50	12,50
Peso unitario seco (lb/ft ³)	111,3	107,12	101,37
% de expansión	0,00	0,00	0,00
% de compactación	98,7	94,96	89,87
% de CBR	243,97	171,57	109,43

Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Comparación % de CBR - % de compactación, estabilización número 3**



Fuente: elaboración propia.

4.7. Cuadro de resultados

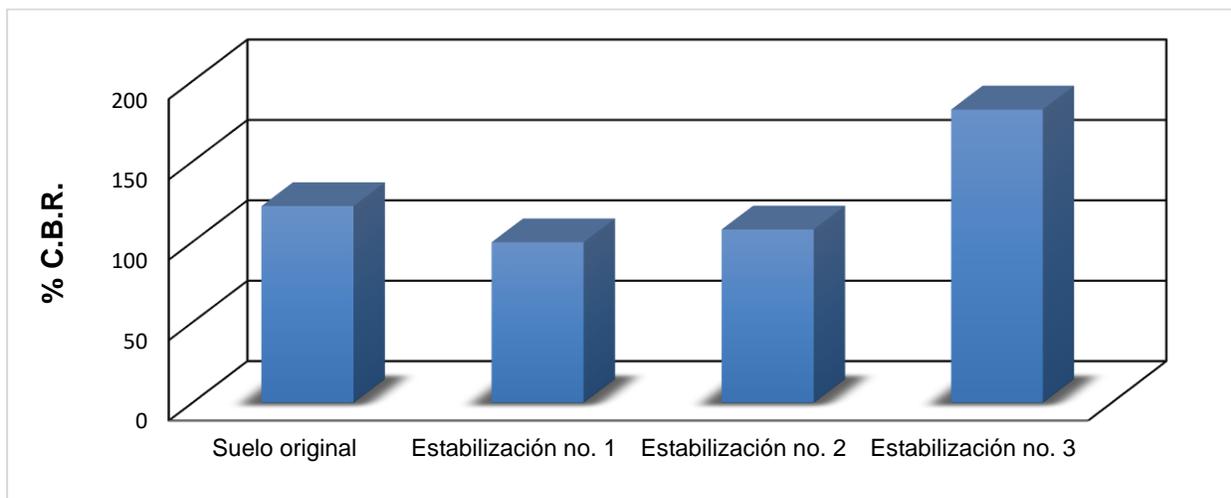
Los resultados obtenidos de los ensayos de prueba estándar para California bearing ratio con diferentes dosificaciones de agentes estabilizadores en el suelo fueron tabulados a continuación, con el fin de compararlos numérica y gráficamente en el siguiente capítulo.

Tabla XXXI. Comparación de resultados para CBR

Muestra	Peso unitario seco máximo (lb/ft ³)	Humedad óptima (%)	% CBR
Suelo original	117,50	11,0	122,31
Estabilización no. 1	111,45	12,4	99,81
Estabilización no. 2	111,50	12,0	107,77
Estabilización no. 3	112,80	11,4	182,40

Fuente: elaboración propia.

Figura 30. Comparación de % CBR



Fuente: elaboración propia.

5. ANALISIS DE RESULTADOS

Los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio fueron tabulados en la tabla XXIX, a fin de comparar la variación de valor soporte “CBR” del suelo inalterado con respecto a los resultados obtenidos para las diversas dosificaciones con los agentes estabilizadores.

5.1. Comparación de resultados

Con base en los resultados de los ensayos de CBR se observa que, para porcentajes pequeños de agentes estabilizadores, la capacidad de valor soporte del suelo disminuye en relación con el suelo inalterado. No obstante, para proporciones mayores la capacidad de valor soporte aumenta de manera considerable; por lo tanto, se define que los agentes estabilizadores mantienen una relación no lineal con la resistencia del suelo.

Tabla XXXII. **Comparación de resultados**

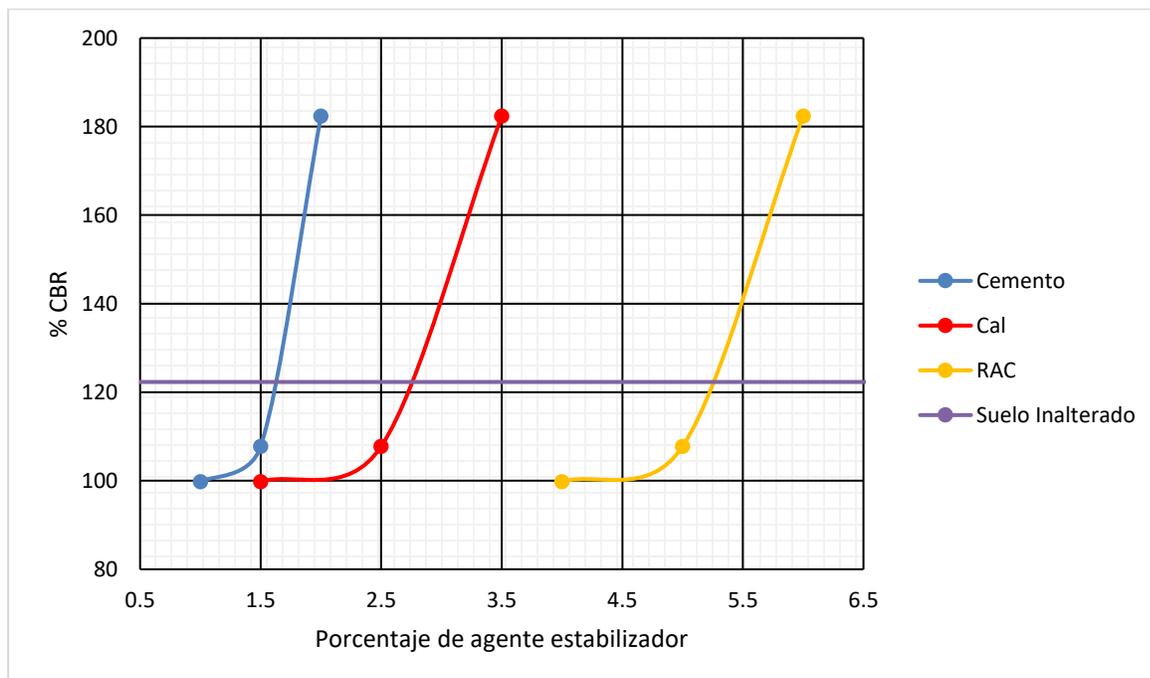
Porcentaje de CBR	122.31	99.81	107.77	182.40
Porcentaje de cemento tipo 1 (PM)	0 %	1 %	1,5%	2 %
Porcentaje de cal	0 %	1,5 %	2,5 %	3,5 %
Porcentaje de concreto asfáltico reciclado y emulsión asfáltica (RAP)	0 %	4 %	5 %	6 %

Fuente: elaboración propia.

Existen infinidad de combinaciones entre los agentes estabilizadores, las cuales varían de acuerdo con el criterio de cada diseñador. Sin embargo, el análisis numérico de las dosificaciones eficientes para estos agentes estabilizadores se realizó de tal manera que se mantuviesen las mismas proporciones que fueron trabajadas en el laboratorio.

El análisis de la reacción en conjunto de todos los materiales presentes en la estabilización resulta complejo, porque su comportamiento preciso solo puede ser estudiado utilizando cálculo en multivariables. Para simplificar procedimiento, se analizó de manera independiente la variación de cada agente en los ensayos iterativos realizados, de esta manera se determinó la dosificación a partir de la cual el valor soporte del suelo tiende a aumentar con respecto al valor original.

Figura 31. **Análisis gráfico para dosificación mínima**



Fuente: elaboración propia.

Los comportamientos de las tres gráficas son semejantes porque las dosificaciones guardan una proporción análoga. Esto se debe a que en la planificación y desarrollo experimental fueron elegidos intervalos constantes para las cantidades de agentes estabilizadores. En las gráficas se observa que existe una dosificación mínima, la cual otorga una capacidad de valor soporte a la muestra modificada que es numéricamente igual a la del suelo inalterado. Los valores de la dosificación mínima fueron tabulados a continuación.

Tabla XXXIII. **Dosificación mínima para resistencia equivalente al suelo inalterado**

Porcentaje de CBR – suelo inalterado	122,31
Porcentaje de cemento tipo 1 (PM)	1,64 %
Porcentaje de cal	2,79 %
Porcentaje de concreto asfáltico reciclado y emulsión asfáltica (RAP)	5,29 %

Fuente: elaboración propia.

Los valores presentados en la tabla anterior son aproximaciones precisas del comportamiento gráfico de cada material, como se indicó en la figura 25; sin embargo, su exactitud es relativa debido a las posibles combinaciones entre los agentes estabilizadores. Es considerada como exactitud relativa, porque los valores definitivos para una dosificación mínima son válidos, si se mantiene las proporciones utilizadas en el desarrollo experimental y se utilizan únicamente los mismos materiales para modificar el suelo.

5.2. Interpretación de resultados

Los agentes estabilizadores incluían dos materiales finos: cemento y cal; un material granular, el concreto asfáltico reciclado y un material ligante, la emulsión asfáltica catiónica de rótula lenta. Cada uno fue elegido en el desarrollo experimental para modificar las características físicas y propiedades mecánicas del suelo.

El uso de cal tiene por objetivo reducir el índice de plasticidad del suelo; sin embargo, el resultado del ensayo de límites de Atterberg, tabla XX, indico que el suelo inalterado tenía, de manera inherente, los mínimos valores posibles para los límites de consistencia. Por lo tanto, el uso de cal no aportó un beneficio a las características físicas del suelo y por el contrario solo aumento la cantidad de material fino en la muestra.

El cemento fue el único material con granulometría fina considerado como beneficioso durante el desarrollo experimental, ya que favoreció en el incremento paulatino de la capacidad de valor soporte, pese a aumentar la cantidad de material fino en el suelo.

La adición material fino que no aporte algún beneficio a una masa de un suelo, no es lo ideal porque el exceso de granos finos puede provocar que la mezcla tenga menos tenacidad, exceso o falta de vacíos, entre otros problemas. La aportación de resistencia por parte cemento y la reducción por parte de la cal, generó una combinación que disminuyó la capacidad de valor soporte del suelo, hasta el punto donde el beneficio generado por el cemento compensó el déficit generado por la cal. En consecuencia, las primeras dos muestras de suelo estabilizado dieron como resultado un menor peso unitario seco y un menor porcentaje de CBR, como fue indicado en la tabla XXXI.

El concreto asfáltico reciclado aportó material granular a la mezcla, compensando así la cantidad de material fino presente en la dosificación. Además de contribuir en el incremento progresivo de la capacidad de valor soporte, también mantuvo la estructura granulométrica del suelo original, la cual cumplía con las especificaciones para bases y sub-bases de la Dirección General de Caminos.

5.3. Comparación económica con otros métodos

La comparación económica se realizó considerando el costo que se tiene al aumentar cincuenta puntos porcentuales de CBR, en un metro cúbico de suelo estabilizado que mantenga las proporciones utilizadas en el desarrollo experimental y sus características físicas sean homogéneas con el suelo analizado. Lo. datos utilizados para el análisis económico se tabularon a continuación:

Tabla XXXIV. **Datos de materiales para análisis económico**

Peso unitario del suelo suelto (kg/m³)	1682,53	
Materiales sólidos	Peso por saco (kg)	Peso unitario (kg/m ³)
Cemento tipo 1 (PM)	42,50	1500,00*
Cal	25,00	590,00*
Pavimento Asfáltico reciclado	50,00	2120,00*
Materiales líquidos	Peso por bote (kg)	Peso unitario (kg/m ³)
Emulsión asfáltica catiónica de rótula lenta Bitumuls CSS-1h	5.00	1021,00*

Fuente: elaboración propia.

Los pesos por unidad de volumen y por unidad comercial del cemento, la cal y la emulsión asfáltica son los utilizados por los proveedores de la región. El peso unitario estimado para el pavimento asfáltico reciclado es el promedio de los valores típicos presentados por el Departamento de Tránsito de los Estados Unidos en su publicación “Directrices del usuario para materiales de desecho y subproductos en la construcción de pavimentos”.²⁷

En la figura 31, se demostró la relación existente entre los agentes estabilizadores y los resultados del ensayo de prueba estándar, CBR. En la tabla que se presenta a continuación, se realizó un análisis de proporcionalidad lineal para determinar la dosificación teórica, que aumenten la capacidad de valor soporte del suelo, en cincuenta puntos porcentuales.

Tabla XXXV. **Cálculo proporcional de dosificación**

Magnitud calculada	Valor real	Valor teórico
Aumento de la capacidad de valor soporte “CBR”	60,09	50,00
Cemento tipo 1 (PM)	2,00 %	1,66 %
Cal	3,50 %	2,91 %
Pavimento asfáltico reciclado	6,00 %	4,99 %
Emulsión asfáltica catiónica de rótula lenta Bitumuls CSS-1h	6,00 %	4,99 %

Fuente: elaboración propia.

²⁷ FHWA. Departamento de Tránsito. *Directrices del usuario para materiales de desecho y subproductos en la construcción de pavimentos*. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/rap131.cfm>. Consulta: 09 de septiembre de 2017.

Con datos investigados de la tabla XXXIV y los cálculos obtenidos de la tabla anterior, se realizó la estimación de la cantidad necesaria de cada agente estabilizador, que en conjunto, aumentan teóricamente la capacidad de valor soporte en cincuenta puntos porcentuales, los resultados obtenidos fueron tabulados a continuación.

Tabla XXXVI. **Cálculo de materiales para dosificación**

Peso unitario del suelo suelto (kg/m³)	1682,53	
Volumen de suelo suelto (m³)	1	
Aumento teórico de la capacidad de valor soporte "CBR"	50.00	
Material sólido necesario	(kg)	Sacos, especificados en tabla XXXI
Cemento tipo 1 (PM)	28,0	0,7
Cal	49,0	2,0
Pavimento asfáltico reciclado	84,0	1,7
Material líquido necesario	(m ³)	Botes estándar de 5 kg
Emulsión asfáltica catiónica de rótula lenta Bitumuls CSS-1h	0,051	10

Fuente: elaboración propia.

Una comparación económica generalizada es un cálculo complicado de realizar, porque no es posible garantizar el contexto en el cual se realizará la obra. Pero sí fue posible estimar cantidades unitarias de los materiales necesario para realizar la estabilización de un suelo con características similares, los cuales fueron tabulados en la tabla anterior.

Los datos calculados para una comparación económica variarán de acuerdo con diversos factores; por ejemplo, la localización del proyecto, el mercado de la región, la inflación de la moneda, entre otros. Por lo tanto, es posible aseverar que es más provechoso el cálculo de materiales en unidades estándar, como fue realizado, que determinar la viabilidad por un costo que generalmente fluctúa de manera continua.

CONCLUSIONES

1. Con base en los resultados de los ensayos para el suelo sin estabilizar, se concluye que sus características físicas y propiedades mecánicas son aptas para constituir la estructura de un pavimento, porque la muestra seleccionada cumple con todos requisitos para un suelo tipo C-1.
2. El uso de cal acrecentó la cantidad granos finos en la masa de suelo; pero no aportó beneficios físicos, ni mecánicos. Los demás agentes estabilizadores generaron un aumento de la capacidad de valor soporte. Por tal razón en los primeros dos ensayos se disminuyó la resistencia del suelo estabilizado, y en el último ensayo aumentó.
3. La única proporción que generó beneficio fue la realizada en la última dosificación, donde los resultados reflejaron que la capacidad soporte del suelo estabilizado fue mayor a la inicial. Se obtuvo la mejoría de 60,08 puntos porcentuales de CBR con respecto al suelo inalterado.
4. Las proporciones que se utilizaron en el desarrollo experimental fueron útiles para calcular la dosificación mínima, la cual permite un incremento diferencial en la capacidad de valor soporte del suelo.
5. Económicamente, la estabilización del suelo con material reciclado de carreteras es más beneficioso porque reutiliza los recursos existentes en el lugar, aumentando su resistencia y favoreciendo al medio ambiente al eliminar el problema de disposición de desechos generados por el método tradicional.

RECOMENDACIONES

1. En el análisis de resultados, se determinó de manera teórica el motivo de la disminución de la capacidad soporte; no obstante, se recomienda realizar los ensayos físico químicos correspondientes, que permitan determinar las causas que ocasionaron resultados negativos en las primeras dos estabilizaciones y positivo en la última estabilización.
2. El método de estabilización utilizado en el desarrollo experimental podría brindar mejores resultados al ser aplicado en un suelo con índice de plasticidad mayor al especificado para un material tipo C-1; en tal situación, la cal aportaría beneficio a las características físicas de la muestra.
3. Sí el suelo cumple con los límites de consistencia especificados por la Dirección General de Caminos, se recomienda no usar cal en una estabilización; porque la cal tiene por objetivo reducir los índices de plasticidad y al carecer el suelo de esa característica física, la adicción de cal únicamente aumenta la cantidad de material fino en la muestra, alterando la granulometría y reduciendo sus propiedades mecánicas.
4. Las dosificaciones para los agentes estabilizadores pueden ser medidas por diversos métodos; sin embargo, los más recomendable es calcularlas con base en el peso del suelo que se desea estabilizar, para tener un mejor control de calidad, ya que medir por cantidad de volumen todos los materiales, resulta innecesariamente complicado.

5. En el caso de suelos que sean poco granulares, se recomienda aprovechar reciclar el concreto asfáltico para aprovechar sus características físicas y propiedades mecánicas, además, reduce los desechos generados al medio ambiente en el proceso de reconstrucción de carreteras.

6. Analizar el beneficio económico entre el método tradicional y el método de reciclado, así como su impacto en el medio ambiente. Verificando que se cumplan los requisitos solicitados por la Dirección General de Caminos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica. *Normas de seguridad estructural de edificios y obras de infraestructura para la República de Guatemala*. Guatemala: AGIES, 2010. 75 p.
2. CABRERA SEIS, Jadenón Vinicio. *Guía teórica y práctica del curso de cimentaciones I*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1994. 155 p.
3. CEPREDENAC. *Manual centroamericano de mantenimiento de carreteras con enfoque de gestión de riesgo y seguridad vial* [en línea]. <<https://goo.gl/fs5LGy>>. [Consulta: 19 de agosto de 2017].
4. DAS. Braja. *Fundamentos de la ingeniería de geotecnia*. 4ª ed. México: Cengage Learning, 2013. 64 - 111 p. ISBN 978-607-519-373-1.
5. Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. Guatemala: CIV, 2001. 212 – 302 p.
6. Dirección General de Caminos. *Plan operativo anual*. <<http://www.caminos.civ.gob.gt/files/Art10Num05-2017-PoaDGC.pdf>>. [Consulta: 17 de julio de 2017].

7. FHWA, Departamento de Tránsito. Directrices del usuario para materiales de desecho y subproductos en la construcción de pavimentos. <<https://goo.gl/JXfNcB>>. [Consulta: 09 de septiembre de 2017].
8. IECA, Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. *Manual de estabilización de suelos con cemento cal*. 2ª ed. España: Vaquero Servicios de Publicación, 2008. 39 p. ISBN 978-84-89702-23-3.
9. MORALES, Carlos. *Control de calidad en la evaluación de pavimentos existentes*. Trabajo de graduación. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2007. 25 p.
10. QUESADA, Israel. *Evaluación del comportamiento de diferentes tramos de carretera rehabilitados utilizando mezclas recicladas en frío*. Trabajo de graduación. Universidad Politécnica de Cataluña, 2004. 12 p.
11. ROSALES, Víctor. *Rehabilitación de carreteras utilizando asfalto espumado, reciclando el pavimento asfáltico existente*. Trabajo de graduación. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2011. 109 p.
12. THENOUX, Guillermo. *Análisis de casos de ahuellamiento en mezclas asfálticas chilenas* [en línea]. <<https://goo.gl/bTr92p>>. [Consulta: 08 de agosto de 2017].

13. UCR. Laboratorio Nacional de Materiales y modelos estructuras. *Método de ensayo para la determinación de deflexiones haciendo uso de un deflectómetro de impacto portable* [en línea]. Costa Rica: Lanamme. <<https://goo.gl/n3LqHX>>. [Consulta: 12 de septiembre de 2017].

14. UCV. *Determinación de la capacidad de soporte del suelo* [en línea]. Chile: Universidad Católica de Valparaíso. <<http://icc.ucv.cl/geotecnia/>>. [Consulta: 1 de septiembre de 2017].

ANEXOS

Anexo 1. Cuarteado de la muestra ensayada



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Laboratorio de Mecánica de Suelos. Facultad de Ingeniería.

Anexo 2. **Dosificación por peso de una muestra de suelo estabilizada**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Laboratorio de Mecánica de Suelos. Facultad de Ingeniería.

Anexo 3. **Equipo de laboratorio para ensayo de análisis granulométrico**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Laboratorio de Mecánica de Suelos. Facultad de Ingeniería.

Anexo 4. **Equipo de laboratorio para ensayo de compactación Proctor**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Laboratorio de Mecánica de Suelos. Facultad de Ingeniería.

Anexo 5. Ficha técnica: emulsión asfáltica catiónica de rótula lenta

FICHA TÉCNICA Emulsión Asfáltica Catiónica de Rotura Lenta Bitumuls® CSS-1h	 ASFALGUA <small>Tecnología Experiencia Calidad</small>
--	--

Los grados de rotura lenta se diseñan para lograr mezclas estables. Todos los grados tienen baja viscosidad, que puede ser aún más reducida con la incorporación de agua. Estos grados pueden también ser usados para riegos de liga y riego pulverizado (top seal) y como paliativos de polvo.

CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS:

Composición	:	Asfalto, agua, emulsificante y aditivo
Color	:	Marrón oscuro
Aspecto	:	Líquido viscoso
Gravedad específica a 25 °C	:	1.021

ESPECIFICACIONES Y CIFRAS TÍPICAS ASTM D2397

Ensayos	Norma	Unidad	Bitumuls® CSS-1h
Ensayos sobre el asfalto original			
Viscosidad Saybolt-Furol (25 °C)	ASTM D-2397	Seg.	20-100
Contenido de Agua en Volumen	ASTM D-2397	%	Máx. 43
Estabilidad al Almacenamiento Sedimentación a las 24 horas	ASTM D-2397	%	Máx. 1
Destilación Contenido de Asfalto Residual Contenido de Disolventes	ASTM D-2397	% %	Min. 57 -
Retenido Tamiz 800 pm	ASTM D-2397	%	Máx. 0.1
Carga de Partícula	ASTM D-2397	-	Positiva
Ensayos sobre el residuo de destilación			
Penetración (25 °C, 100g, 5 s)	ASTM D-5	0.1 mm	40-90
Ductilidad (25 °C, 5 cm/min)	ASTM D-113	cm	Min. 40
Solubilidad en Tricloroetileno	ASTM D-2042	%	Min. 97.5

ALMACENAMIENTO

Se almacena en sistemas o tanques a una temperatura de 0 °C a 60 °C.

ASESORAMIENTO TÉCNICO

Para aplicaciones o compuestos que no estén contenidos en esta Hoja Técnica, consulte al Departamento Técnico de Asfalga – 11 avenida 38-60 zona 11 Las Charcas.

SALUD Y SEGURIDAD:

La emulsión asfáltica Bitumuls® CSS-1h no presenta riesgos para la salud cuando es usado en las aplicaciones recomendadas y se observan los niveles adecuados de higiene personal e industrial.

11 avenida 38-60, Zona 11 Las Charcas PBX 2463-3500 info@asfalga.com www.asfalga.com	Revisado Por: Laboratorio Central Página: 1 de 1
--	---

Fuente: Asfaltos de Guatemala.

Anexo 6. Resultados del ensayo de límites de Atterberg



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



INFORME No. 541 S.S.

O.T.: 37,932

No. 11972

Interesado: Kevin David Pinto Enriquez

Proyecto: Trabajo de Graduación "Estabilización Mecánica de Suelos Tipo C-1 Para Sub-bases y Bases Utilizando Cemento, Cal Hidratada y Concreto Asfáltico Reciclado"

Asunto: ENSAYO DE LIMITES DE ATTERBERG

Norma: AASHTO T-89 Y T-90

Ubicación: Sección Mecánica de Suelos, USAC

FECHA: miércoles, 15 de noviembre de 2017

RESULTADOS:

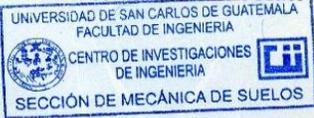
ENSAYO No.	MUESTRA No.	L.L. (%)	I.P. (%)	CLASIFICACION *	DESCRIPCION DEL SUELO
1	1	N.P.	N.P.	ML	Arena Limosa Color Café

(*) CLASIFICACION SEGÚN CARTA DE PLASTICIDAD

Observaciones: Muestra proporcionado por el interesado.

Atentamente,

Omar E. Medraño Méndez
Ing. Omar Enrique Medraño Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos



Vo.Bo. *[Signature]*
Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz
DIRECTOR CII/USAC



FACULTAD DE INGENIERÍA — USAC —
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Anexo 8. Resultados del ensayo de compactación, suelo inalterado



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



INFORME No. 543 S.S.

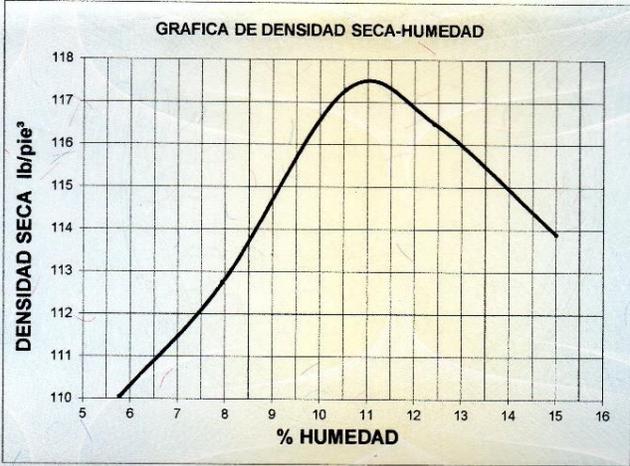
O.T.: 37,932

No. 13061

Interesado: Kevin David Pinto Enriquez
 Asunto: ENSAYO DE COMPACTACIÓN. Proctor Estándar: () Norma: A.A.S.H.T.O. T-99
 Proyecto: Trabajo de Graduación "Estabilización Mecánica de Suelos Tipo C-1 Para Sub-bases y Bases Utilizando Cemento, Cal Hidratada y Concreto Asfáltico Reciclado" Proctor Modificado: (X) Norma: A.A.S.H.T.O. T-180

Ubicación: Sección Mecánica de Suelos, USAC
 Fecha: miércoles, 15 de noviembre de 2017

GRAFICA DE DENSIDAD SECA-HUMEDAD



% HUMEDAD	DENSIDAD SECA lb/pe³
6	110.0
7	111.5
8	112.5
9	113.5
10	114.5
11	117.5
12	116.5
13	115.5
14	114.5
15	113.5

Descripción del suelo: Arena Limosa Color Café
 Densidad seca máxima γ_d : 1,882.35 Kg/m³ 117.50 lb/pe³
 Humedad óptima Hop.: 11.00 %
 Observaciones: Muestra proporcionado por el interesado.
 Atentamente,

Omar Enrique Medrano Méndez
 Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
 Jefe Sección Mecánica de Suelos

Vo. Bo. *Francisco Javier Quiñónez de la Cruz*
 Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz
 DIRECTOR CII/USAC

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERIA

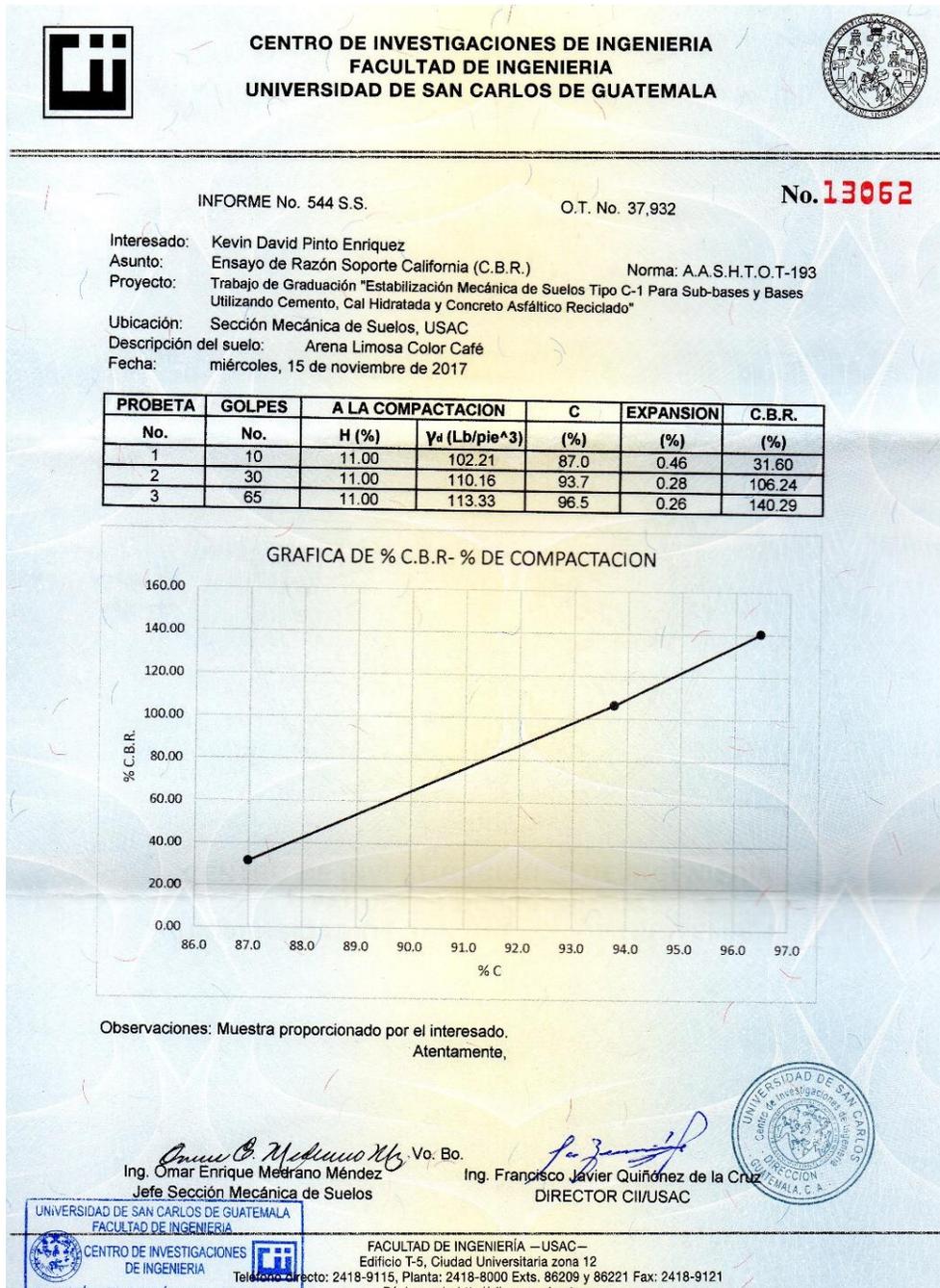


CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA –USAC–
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Anexo 9. Resultados del ensayo de CBR suelo inalterado



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Anexo 10. **Resultados del ensayo de compactación, estabilización
núm. 1**



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



INFORME No. 547 S.S.

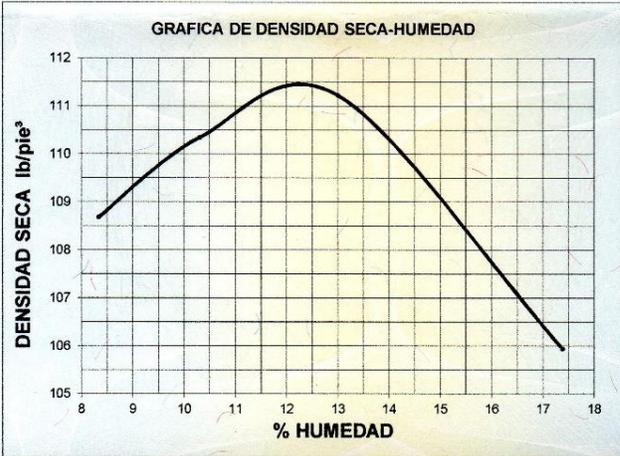
O.T.: 37,932

No. 13065

Interesado: Kevin David Pinto Enriquez
 Asunto: ENSAYO DE COMPACTACIÓN. Proctor Estándar: () Norma: A.A.S.H.T.O. T-99
 Proyecto: Trabajo de Graduación "Estabilización Mecánica de Suelos Tipo C-1 Para Sub-bases y Bases Utilizando Cemento, Cal Hidratada y Concreto Asfáltico Reciclado". Proctor Modificado: (X) Norma: A.A.S.H.T.O. T-180

Ubicación: Sección Mecánica de Suelos, USAC
 Fecha: miércoles, 15 de noviembre de 2017

GRAFICA DE DENSIDAD SECA-HUMEDAD



% HUMEDAD	DENSIDAD SECA lb/ft³
8	108.5
9	109.5
10	110.5
11	111.0
12	111.45
13	111.0
14	110.0
15	109.0
16	108.0
17	107.0
18	106.0

Descripción del suelo: Arena Limosa Color Café

Densidad seca máxima γ_d : 1,785.43 Kg/m³ 111.45 lb/ft³

Humedad óptima Hop.: 12.40 %

Observaciones: Muestra proporcionado por el interesado. Proporción 1, 1.5, 4. Atentamente,

Omar Enrique Medrano Méndez
 Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
 Jefe Sección Mecánica de Suelos

Vo. Bo. *Francisco Javier Quiñonez de la Cruz*
 Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz
 DIRECTOR CII/USAC





CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
SECCIÓN DE MECÁNICA DE SUELOS

FACULTAD DE INGENIERIA –USAC–
 Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
 Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
 Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Anexo 11. Resultados del ensayo de CBR estabilización núm. 1



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



INFORME No. 548 S.S.

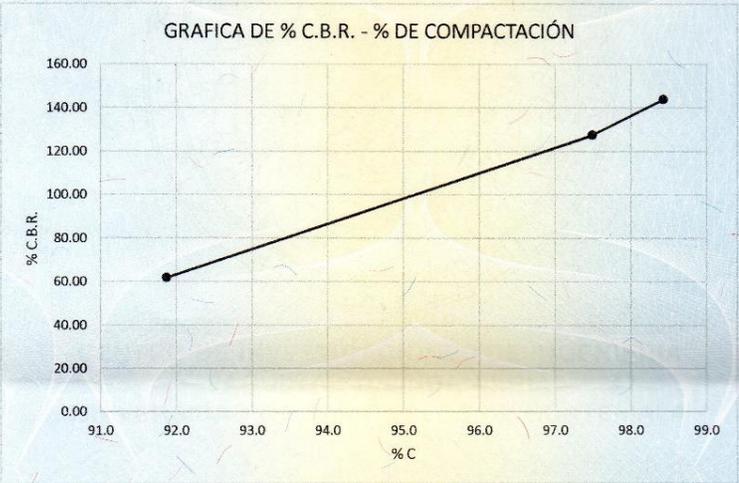
O.T. No. 37,932

No. 13066

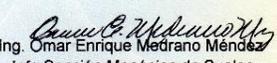
Interesado: Kevin David Pinto Enriquez
 Asunto: Ensayo de Razón Soporte California (C.B.R.) Norma: A.A.S.H.T.O.T-193
 Proyecto: Trabajo de Graduación "Estabilización Mecánica de Suelos Tipo C-1 Para Sub-bases y Bases Utilizando Cemento, Cal Hidratada y Concreto Asfáltico Reciclado"
 Ubicación: Sección Mecánica de Suelos, USAC
 Descripción del suelo: Arena Limosa Color Café
 Fecha: miércoles, 15 de noviembre de 2017

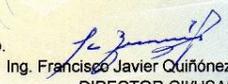
PROBETA	GOLPES	A LA COMPACTACION		C	EXPANSION	C.B.R.
No.	No.	H (%)	γ_d (Lb/pie ³)	(%)	(%)	(%)
1	10	12.40	102.39	91.9	0.07	61.80
2	30	12.40	108.66	97.5	0.04	127.49
3	65	12.40	109.70	98.4	0.02	143.87

GRAFICA DE % C.B.R. - % DE COMPACTACIÓN



Observaciones: Muestra proporcionado por el interesado. Proporción 1, 1.5, 4.
Atentamente,


 Vo. Bo.
 Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
 Jefe Sección Mecánica de Suelos


 Ing. Francisco Javier Quiñón de la Cruz
 DIRECTOR CII/USAC





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERIA
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
SECCIÓN DE MECÁNICA DE SUELOS

FACULTAD DE INGENIERIA – USAC –
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Anexo 12. Resultados del ensayo de compactación, estabilización
núm. 2



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



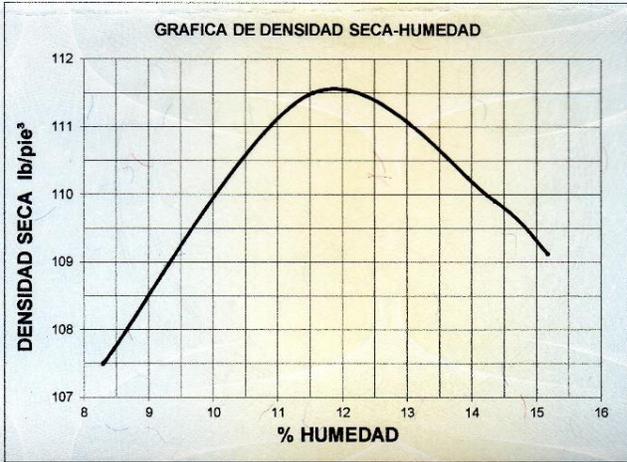
INFORME No. 549 S.S.

O.T.: 37,932

No. 13067

Interesado: Kevin David Pinto Enriquez
 Asunto: ENSAYO DE COMPACTACIÓN. Proctor Estándar: () Norma: A.A.S.H.T.O. T-99
 Proyecto: Trabajo de Graduación "Estabilización Mecánica de Suelos Tipo C-1 Para Sub-bases y Bases Utilizando Cemento, Cal Hidratada y Concreto Asfáltico Reciclado" Proctor Modificado: (X) Norma: A.A.S.H.T.O. T-180
 Ubicación: Sección Mecánica de Suelos, USAC
 Fecha: miércoles, 15 de noviembre de 2017

GRAFICA DE DENSIDAD SECA-HUMEDAD



% HUMEDAD	DENSIDAD SECA lb/ft³
8	107.5
9	109.5
10	110.5
11	111.2
12	111.5
13	111.0
14	110.0
15	109.0

Descripción del suelo: Arena Limosa Color Café
 Densidad seca máxima γ_d : 1,786.23 Kg/m³ 111.50 lb/ft³
 Humedad óptima Hop.: 12.00 %
 Observaciones: Muestra proporcionado por el interesado. Proporción 1.5, 2.5, 5.
 Atentamente,

Omar E. Medrano Méndez
 Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
 Jefe Sección Mecánica de Suelos

Vo. Bo. *F. Quiñonez*
 Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz
 DIRECTOR CII/USAC





CENTRO DE INVESTIGACIONES
DE INGENIERIA
SECCIÓN DE MECÁNICA DE SUELOS

FACULTAD DE INGENIERIA —USAC—
 Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
 Teléfono: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
 Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Anexo 13. Resultados del ensayo de CBR estabilización núm. 2



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



INFORME No. 550 S.S.

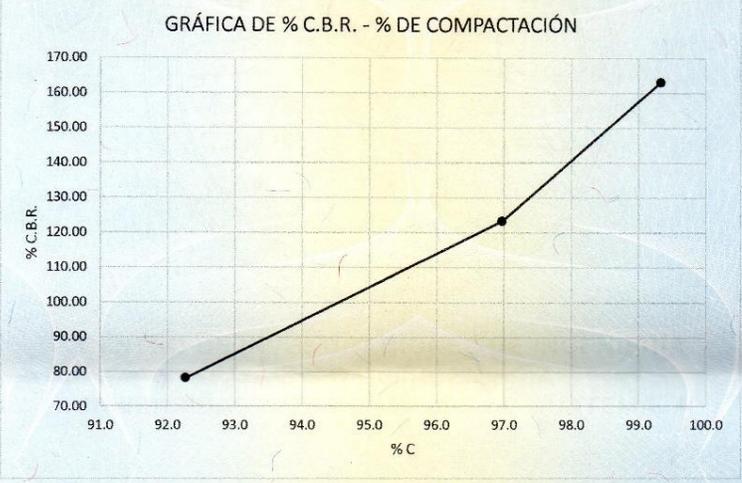
O.T. No. 37,932

No. 13068

Interesado: Kevin David Pinto Enriquez
 Asunto: Ensayo de Razón Soporte California (C.B.R.) Norma: A.A.S.H.T.O.T-193
 Proyecto: Trabajo de Graduación "Estabilización Mecánica de Suelos Tipo C-1 Para Sub-bases y Bases Utilizando Cemento, Cal Hidratada y Concreto Asfáltico Reciclado"
 Ubicación: Sección Mecánica de Suelos, USAC
 Descripción del suelo: Arena Limosa Color Café
 Fecha: miércoles, 15 de noviembre de 2017

PROBETA No.	GOLPES No.	A LA COMPACTACION		C (%)	EXPANSION (%)	C.B.R. (%)
		H (%)	γ_d (Lb/plie^3)			
1	10	12.00	102.87	92.3	0.02	78.17
2	30	12.00	108.12	97.0	0.00	123.31
3	65	12.00	110.75	99.3	0.00	163.13

GRÁFICA DE % C.B.R. - % DE COMPACTACIÓN



Observaciones: Muestra proporcionado por el interesado. Proporción 1.5, 2.5, 5.
Atentamente,

Omar Enrique Médrano Méndez
 Ing. Omar Enrique Médrano Méndez
 Jefe Sección Mecánica de Suelos

Vo. Bo. *Francisco Javier Quiñonez de la Cruz*
 Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz
 DIRECTOR CII/USAC



CENTRO DE INVESTIGACIONES
DE INGENIERIA
SECCIÓN DE MECÁNICA DE SUELOS



FACULTAD DE INGENIERÍA –USAC–
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Anexo 14. Resultados del ensayo de compactación, estabilización
núm. 3



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



INFORME No. 545 S.S.

O.T.: 37,932

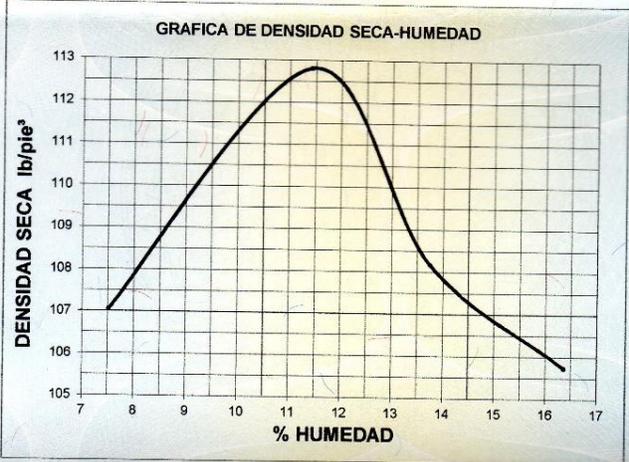
No. 13063

Interesado: Kevin David Pinto Enriquez
 Asunto: ENSAYO DE COMPACTACIÓN.
 Proyecto: Trabajo de Graduación "Estabilización Mecánica de Suelos Tipo C-1 Para Sub-bases y Bases Utilizando Cemento, Cal Hidratada y Concreto Asfáltico Reciclado"

Proctor Estándar: () Norma: A.A.S.H.T.O. T-99
 Proctor Modificado: (X) Norma: A.A.S.H.T.O. T-180

Ubicación: Sección Mecánica de Suelos, USAC
 Fecha: miércoles, 15 de noviembre de 2017

GRAFICA DE DENSIDAD SECA-HUMEDAD



% HUMEDAD	DENSIDAD SECA lb/ft³
7.5	107.0
8.0	108.0
9.0	110.0
10.0	111.5
11.0	112.5
11.4	112.80
12.0	112.0
13.0	110.0
14.0	108.0
15.0	107.0
16.0	106.0

Descripción del suelo: Arena Limosa Color Café
 Densidad seca máxima γ_d : 1,807.06 Kg/m³ 112.80 lb/ft³
 Humedad óptima Hop.: 11.40 %
 Observaciones: Muestra proporcionado por el interesado. Proporción 2, 3.5, 6.
 Atentamente,

Omar E. Medrano Méndez
 Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
 Jefe Sección Mecánica de Suelos

Vo. Bo. *[Signature]*
 Ing. Francisco Javier Quiñón de la Cruz
 DIRECTOR CII/USAC



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERIA

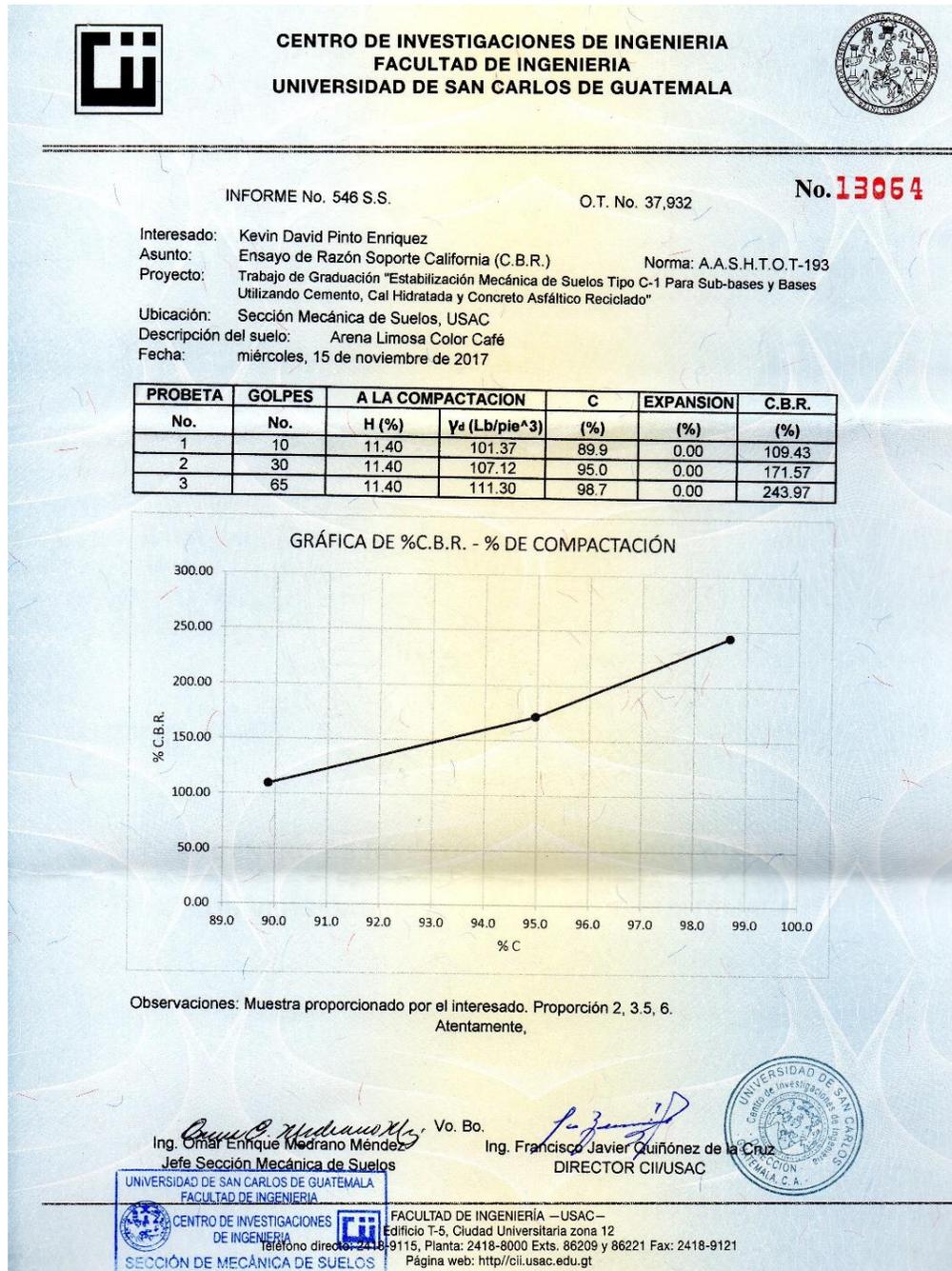
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
Teléfono directo 2418-9115

SECCIÓN DE MECÁNICA DE SUELOS

FACULTAD DE INGENIERIA — USAC—
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de investigaciones de Ingeniería.

Anexo 15. Resultados del ensayo de CBR estabilización núm. 3



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

