



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

**ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA PARA EL
EMPLEO EN SUBBASES Y BASES**

Estuardo Alberto Divas Hidalgo

Asesorado por el Ing. Yefry Valentín Rosales Juárez

Guatemala, mayo de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA PARA EL
EMPLEO EN SUBBASES Y BASES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ESTUARDO ALBERTO DIVAS HIDALGO

ASESORADO POR EL ING. YEFRY VALENTÍN ROSALES JUÁREZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, MAYO DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Ángel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Óscar Humberto Galicia Núñez
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. Omar Enrique Medrano Méndez
EXAMINADOR	Ing. Daniel Alfredo Cruz Pineda
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero
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 DE SUELOS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA PARA EL EMPLEO EN SUBBASES Y BASES

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 13 de octubre de 2015.



Estuardo Alberto Divas Hidalgo

Guatemala, 13 de marzo de 2018

Ingeniero
José Gabriel Ordoñez Morales
Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles
Universidad de San Carlos de Guatemala
Guatemala

Ingeniero Ordoñez:

Al saludarle cordialmente, me dirijo a usted para informarle que ha sido concluido satisfactoriamente el trabajo de graduación titulado: **“ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA PARA EL EMPLEO EN SUBBASES Y BASES”** elaborado por el estudiante Estuardo Alberto Divas Hidalgo con carné 201114415, tema para el cual fui asignado como asesor.

Considero que se han cumplido las metas propuestas al inicio del trabajo, por lo que recomiendo se apruebe en el entendido de que el autor y el suscrito son los responsables de lo trabajado y de las conclusiones del mismo.

Atentamente,



Yefry Valentín Rosales Juárez
Msc. Ingeniero Civil Colegiado No. 7177



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

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

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Guatemala,
18 de abril 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 DE SUELOS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA PARA EL EMPLEO EN SUBBASES Y BASES** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Estuardo Alberto Divas Hidalgo quien contó con la asesoría del Ing. Yefry Valentín Rosales Juárez.

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. Yefry Valentín Rosales Juárez y Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación del estudiante Estuardo Alberto Divas Hidalgo ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA PARA EL EMPLEO EN SUBBASES Y BASES da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, mayo 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: **ESTABILIZACION DE SUELOS CON EMULSION ASFALTICA PARA EL EMPLEO EN SUBBASES Y BASES**, presentado por el estudiante universitario: **Estuardo Alberto Divas Hidalgo**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Ángel Roberto Sic García
Decano en Funciones

Guatemala, mayo de 2018



/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por darme vida, salud, familia, amigos, sabiduría y fuerza para poder estudiar y graduarme de esta profesión.
Mis padres	Estuardo Divas y Mirtala Hidalgo de Divas, por darme la vida y su apoyo incondicional en todo momento.
Mis hermanas	Jennipher Divas, Astrid Divas y Mariela Divas, por el amor y apoyo que nos tenemos.
Mis abuelos	Raúl Divas (q.e.p.d.), Graciela Castellanos de Divas, Anselmo Véliz (q.e.p.d.) y Francisca López, por haberme dado su apoyo, experiencias y enseñanzas de la vida.
Mi sobrino	Diego Hernández, por ser parte de mi vida, a quien quiero como hijo.
Mis tíos	Blanca Divas de Free, Mariela Divas de Martínez, Araceli López, Kevin Santos, Carlos Véliz, Klifor Véliz, Ingar Véliz y Erick Véliz, por su apoyo incondicional e instruirme en la vida.

Mi novia

María Álvarez, por ser un ser muy especial en mi vida y en mi carrera.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por ser la luz en mi camino y darme la vida para alcanzar este sueño.
La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi alma <i>máter</i> que me brindó su techo y la oportunidad de lograr una profesión.
Facultad de Ingeniería	Por ser mi casa de estudios en donde logré ser un profesional, lo cual se vuelve importante para mi nueva vida.
Escuela de Ingeniería Civil	Por darme el espacio de poder ser un profesional más dentro de este campo.
Mis padres	Por brindarme su amor y apoyo incondicional durante toda mi vida y ser ejemplo a seguir.
Mis hermanas	Porque siempre han estado a mi lado y me han apoyado en todo.
Mis tíos	Por darme su apoyo y cariño sin condición alguna.
Mis Abuelas	Porque me criaron como a un hijo, inculcándome valores con gran amor.

Mi novia	Por apoyarme grandemente en esta etapa muy importante de mi vida.
Mis amigos de la Facultad	Por el apoyo, la amistad y buenos momentos que hemos pasado juntos en este sendero del aprendizaje.
Ing. Yefry Rosales	Por impartirme sus conocimientos profesionales y su asesoría en mi trabajo de graduación.
Ing. Omar Medrano	Por ser un buen catedrático que, aparte de compartirme sus conocimientos, me ha regalado sus consejos.
Ing. Gabriel Ordoñez	Por ser parte de los mejores catedráticos que me han instruido dentro de la carrera.
Ing. José Istupe	Por su amistad sincera e incondicional que nos formó como estudiantes.
Ing. Rolando Ríos	Por su amistad y apoyo profesional dentro de nuestra carrera.
Br. Byron García	Por su apoyo, amistad y ayuda en la elaboración de ensayos de trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. CONOCIMIENTOS GENERALES.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Cemento asfáltico	1
1.2.1. Características y propiedades	2
1.2.1.1. Físicas	2
1.2.1.2. Mecánicas.....	3
1.2.1.3. Químicas.....	3
1.2.2. Ensayos.....	4
1.3. Emulsiones asfálticas	4
1.3.1. Emulsiones	4
1.3.1.1. Tipos de emulsiones.....	5
1.3.1.2. Estabilidad de las emulsiones.....	6
1.3.2. Emulsiones asfálticas	6
1.3.2.1. Tipos de emulsiones asfálticas	7
1.3.2.2. Ensayos de las emulsiones asfálticas	8
1.3.2.3. Rompimiento de las emulsiones asfálticas.....	14

1.3.3.	Emulsificantes	15
1.4.	Suelos finos de baja plasticidad	17
1.4.1.	Características	18
1.4.2.	Características y propiedades	19
1.4.2.1.	Físicas	19
1.4.2.2.	Mecánicas	19
1.4.2.3.	Químicas	19
1.4.3.	Clasificación	20
1.5.	Ensayos	20
1.6.	Subbases y bases	21
1.6.1.	Especificaciones.....	21
1.6.1.1.	Calidad de los materiales	22
1.6.2.	Tipos de estabilizaciones	24
1.6.2.1.	Estabilización física	24
1.6.2.2.	Estabilización química.....	25
1.7.	Estabilización con emulsión asfáltica	25
1.7.1.	Elaborado de la estabilización.....	25
1.7.1.1.	Manejo y almacenamiento de la emulsión asfáltica.....	27
1.7.1.2.	Preparación del suelo.....	28
1.7.1.3.	Preparación de la emulsión asfáltica	28
1.7.1.4.	Aplicación de la emulsión asfáltica en tres diferentes cantidades a cada tipo de suelo.....	29
1.7.1.5.	Curado y protección	30
1.7.1.6.	Ensayos.....	30
2.	DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	33
2.1.	Muestras de suelo.....	33
2.1.1.	Granulometría según la norma AASTHO T-88.....	33

2.1.2.	Peso unitario según la norma AASHTO T-19	33
2.1.3.	Gravedad según la norma AASHTO T-85	34
2.1.4.	Equivalente de arena según la norma AASHTO T-176.....	34
2.1.5.	Límites de Atterberg según las normas AASHTO T-89-10 y T-90-00.....	34
2.1.6.	Permeabilidad según la norma AASHTO T-215	35
2.1.7.	Proctor modificado según la norma AASHTO T-180-01	35
2.1.8.	Valor Soporte California (CBR) según la norma AASHTO T-193-99	35
2.2.	Muestras de suelos estabilizados con emulsión asfáltica.....	36
2.2.1.	Resistencia a la compresión no confinada de probetas según la norma ASTM D 1663-00.....	36
2.2.2.	Estabilidad y flujo Marshall según la norma AASHTO T-245.....	36
3.	CÁLCULOS EFECTUADOS PARA CADA ENSAYO	39
3.1.	Muestras de suelos en condiciones naturales.	39
3.1.1.	Granulometría.....	39
3.1.2.	Peso unitario.....	40
3.1.3.	Gravedad específica.....	41
3.1.4.	Equivalente de arena.....	41
3.1.5.	Límites de Atterberg	41
3.1.6.	Permeabilidad.....	42
3.1.7.	Proctor modificado.....	42
3.1.8.	CBR.....	46
3.2.	Muestras de suelos estabilizados con emulsión asfáltica.....	49
3.2.1.	Resistencia a la compresión no confinada de probetas.....	51

3.2.2.	Estabilidad y flujo Marshall	52
3.3.	Resultados obtenidos.....	52
3.3.1.	Muestras de suelos en condiciones naturales.....	52
3.3.1.1.	Granulometría	53
3.3.1.2.	Peso unitario	57
3.3.1.3.	Gravedad específica	58
3.3.1.4.	Equivalente de arena.	58
3.3.1.5.	Límites de Atterberg	59
3.3.1.6.	Permeabilidad	60
3.3.1.7.	Proctor modificado	61
3.3.1.8.	CBR.....	65
3.3.1.9.	Resistencia a la compresión no confinada.....	69
3.3.2.	Muestras de suelos en condiciones estabilizadas con emulsión asfáltica.	72
3.3.2.1.	Límites de Atterberg	72
3.3.2.2.	Permeabilidad	72
3.3.2.3.	Proctor modificado	74
3.3.2.4.	CBR.....	78
3.3.2.5.	Resistencia a la compresión no confinada.....	81
3.3.2.6.	Estabilidad y flujo Marshall.....	84
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO.....	85
4.1.	Estabilización con emulsión asfáltica en los diferentes suelos	85
4.2.	Muestras de suelos	85
4.2.1.	Granulometría.	85
4.2.2.	Peso unitario	87

4.2.3.	Gravedad específica.....	87
4.2.4.	Equivalente de arena.....	88
4.2.5.	Límites de Atterberg	88
4.2.6.	Permeabilidad.....	91
4.2.7.	Proctor modificado.....	91
4.2.8.	CBR.....	93
4.2.9.	Resistencia a la compresión no confinada de probetas.....	95
4.2.10.	Estabilidad y flujo Marshall	102
CONCLUSIONES		105
RECOMENDACIONES.....		107
BIBLIOGRAFÍA.....		109
ANEXOS.....		111

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Fases de la emulsión	5
2.	Tipos de emulsiones asfálticas	7
3.	Ensayo de carga en las partículas	8
4.	Ensayo de viscosidad Saybolt Furol.....	9
5.	Ensayo de destilación para emulsiones asfálticas	13
6.	Densidad seca-húmeda relativa.....	45
7.	Curva de penetración	48
8.	Granulometría de la muestra 1	54
9.	Granulometría de la muestra 2.....	55
10.	Granulometría de la muestra 3.....	57
11.	Proctor modificado de la muestra 1	62
12.	Proctor modificado de la muestra 2.....	63
13.	Proctor modificado de la muestra 3.....	65
14.	CBR de la muestra 1	66
15.	CBR de la muestra 2	67
16.	CBR de la muestra 3	68
17.	Resistencia a la compresión no confinada de la muestra 1	69
18.	Resistencia a la compresión no confinada de la muestra 2	70
19.	Resistencia a la compresión no confinada de la muestra 3	71
20.	Proctor modificado de la muestra 1 estabilizada.....	75
21.	Proctor modificado de la muestra 2 estabilizada.....	76
22.	Proctor modificado de la muestra 3 estabilizada.....	77
23.	CBR de la muestra 1 estabilizada	78

24.	CBR de la muestra 2 estabilizada.....	79
25.	CBR de la muestra 3 estabilizada.....	80
26.	Resistencia a la compresión no confinada de la muestra 1 estabilizada.....	81
27.	Resistencia a la compresión no confinada de la muestra 2 estabilizada.....	82
28.	Resistencia a la compresión no confinada de la muestra 3 estabilizada.....	83
29.	CBR de suelo natural vs suelo estabilizado de la muestra 1	93
30.	CBR de suelo natural vs suelo estabilizado de la muestra 2	94
31.	CBR de suelo natural vs suelo estabilizado de la muestra 3	94
32.	Resistencia a la compresión no confinada, suelo natural vs suelo estabilizado de la muestra 1	99
33.	Resistencia a la compresión no confinada, suelo natural vs suelo estabilizado de la muestra 2	100
34.	Resistencia a la compresión no confinada, suelo natural vs suelo estabilizado de la muestra 3	101

TABLAS

I.	Clasificación de las emulsiones asfálticas de acuerdo a su tipo de rompimiento	15
II.	Porcentaje de emulsificante según el tipo de emulsión	17
III.	Requisitos para los materiales bituminosos.....	23
IV.	Especificaciones del ensayo Marshall	24
V.	Valores de F.S.E.....	26
VI.	Estabilidad y flujo Marshall de la muestra 1 estabilizada	52
VII.	Granulometría de la muestra 1	53
VIII.	Granulometría de la muestra 2	54

IX.	Granulometría de la muestra 3.....	56
X.	Gravedad específica	58
XI.	Equivalente de arena	58
XII.	Límites de Atterberg de la muestra 3	59
XIII.	Permeabilidad de la muestra 1.....	60
XIV.	Permeabilidad de la muestra 2.....	60
XV.	Permeabilidad de la muestra 3.....	61
XVI.	Proctor modificado de la muestra 1.....	61
XVII.	Proctor modificado de la muestra 2.....	62
XVIII.	Proctor modificado de la muestra 3.....	64
XIX.	CBR de la muestra 1	66
XX.	CBR de la muestra 2	67
XXI.	CBR de la muestra 3	68
XXII.	Resistencia a la compresión no confinada de la muestra 1	69
XXIII.	Resistencia a la compresión no confinada de la muestra 2	70
XXIV.	Resistencia a la compresión no confinada de la muestra 3	71
XXV.	Permeabilidad de la muestra 1 estabilizada.....	72
XXVI.	Permeabilidad de la muestra 2 estabilizada.....	73
XXVII.	Permeabilidad de la muestra 3 estabilizada.....	73
XXVIII.	Proctor modificado de la muestra 1 estabilizada.....	74
XXIX.	Proctor modificado de la muestra 2 estabilizada.....	75
XXX.	Proctor modificado de la muestra 3 estabilizada.....	77
XXXI.	CBR de la muestra 1 estabilizada	78
XXXII.	CBR de la muestra 2 estabilizada	79
XXXIII.	CBR de la muestra 3 estabilizada	80
XXXIV.	Resistencia a la compresión no confinada, muestra 1 estabilizada	81
XXXV.	Resistencia a la compresión no confinada, muestra 2 estabilizada	82
XXXVI.	Resistencia a la compresión no confinada, muestra 3 estabilizada	83
XXXVII.	Estabilidad y flujo Marshall de la muestra 1 estabilizada	84

XXXVIII.	Estabilidad y flujo Marshall de la muestra 2 estabilizada	84
XXXIX.	Estabilidad y flujo Marshall de la muestra 3 estabilizada	84
XL.	Granulometría de la muestra 1	85
XLI.	Granulometría de la muestra 2	86
XLII.	Granulometría de la muestra 3	86
XLIII.	Peso unitario	87
XLIV.	Gravedad específica	87
XLV.	Equivalente de arena	88
XLVI.	Límites de Atterberg de la muestra 1	88
XLVII.	Límites de Atterberg de la muestra 2	89
XLVIII.	Límites de Atterberg de la muestra 3	89
XLIX.	Límites de Atterberg de la muestra 1 estabilizada con emulsión asfáltica.....	89
L.	Límites de Atterberg de la muestra 2 estabilizada con emulsión asfáltica.....	90
LI.	Límites de Atterberg de la muestra 3 estabilizada con emulsión asfáltica.....	90
LII.	Permeabilidad de los suelos naturales y estabilizados	91
LIII.	Proctor modificado de los suelos naturales y estabilizados	91
LIV.	Resistencia a la compresión no confinada, muestra 1	95
LV.	Resistencia a la compresión no confinada, muestra 2.....	96
LVI.	Resistencia a la compresión no confinada, muestra 3.....	96
LVII.	Resistencia a la compresión no confinada, muestra 1 estabilizada	97
LVIII.	Resistencia a la compresión no confinada, muestra 2 estabilizada	97
LIX.	Resistencia a la compresión no confinada, muestra 3 estabilizada	98
LX.	Lectura del dial y deformación Marshall.....	102
LXI.	Estabilidad y flujo Marshall de la muestra 1	102
LXII.	Estabilidad y flujo Marshall de la muestra 2.....	102
LXIII.	Estabilidad y flujo Marshall de la muestra 3.....	103

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
°C	Grados centígrados o grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit
g	Gramos
hrs	Horas
Kg	Kilogramos
Lbf	Libras fuerza
m	Metros
m ²	Metros cuadrados
m ³	Metros cúbicos
μm	Micrómetro
ml	Mililitros
mm	Milímetros
plg	Pulgadas
seg	Segundos

GLOSARIO

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials, Asociación Estadounidense de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transportación.
Amina cuaternaria	Compuestos químicos orgánicos que se consideran como derivados del amoníaco y resultan de la sustitución de los hidrógenos de la molécula por los radicales alquilo.
Aniónico	Es un ion con carga negativa.
ASTM	American Society of Testing Materials, Asociación Americana de Ensayo de Materiales.
Calcáreos	Materiales que poseen calcio.
Carbonato de calcio	Es una sustancia común que se encuentra en las rocas en todas partes del mundo.
Catiónica	Es un ion con carga positiva.
Coagulación	Ocurre cuando un líquido se espesa o se solidifica.

Coaslecencia	Unión de las partículas en suspensión coloidal o de las gotitas de una emulsión asfáltica para formar granos o gotas mayores.
Cohesivo	Mantiene una unión estrecha entre masas.
Denudación	Desprendimiento de partículas en la emulsión asfáltica.
Diamina	Es una sustancia química, siendo un líquido de olor semejante al amoníaco.
Disociar	Separación de distintos componentes de una sustancia.
Emulgente	Sustancia que ayuda en la mezcla de dos sustancias difíciles de mezclar.
Floculación	Adición de sustancias coloidales presentes en una emulsión, facilitando la decantación y filtrado.
Hidrocarburado	Compuesto químico formado por carbono e hidrógeno.
Miscelares	Partículas difíciles de mezclar en cualquier proporción.
Saponificado	Hidrólisis de un compuesto orgánico.

RESUMEN

La estabilización de suelos se realiza con el fin de mejorar las propiedades mecánicas de los mismos, de esta manera los suelos estarían capacitados para soportar las cargas vehiculares, en el caso de carreteras, o cargas de edificaciones, en el caso de estructuras. La emulsión asfáltica consigue reducir en porcentaje adecuado la plasticidad de los suelos, otorgándole una mejor adherencia a las partículas del suelo y mejorando la resistencia a la compresión, por ende mejorará su capacidad de soportar las cargas vehiculares.

La técnica se realiza para subbases o bases de carreteras donde el TPDA es muy poco, el tránsito de vehículos pesados es menor y se estabilizan suelos que muestren ser de poca plasticidad y que, en condiciones críticas, es decir en presencia de humedad, no puedan ser transitables.

OBJETIVOS

General

Demostrar cómo estabilizar suelos finos con emulsión asfáltica, siendo estos admisibles para la trabajabilidad como subbase o base para una carpeta de rodadura.

Específicos

1. Establecer de qué manera se pueden mejorar las condiciones físicas y propiedades mecánicas de los suelos al estabilizarlos con emulsión asfáltica.
2. Determinar cómo disminuir la plasticidad de los suelos al agregarles diferentes cantidades de emulsión asfáltica.
3. Ensayar varias estabilizaciones con diferentes porcentajes de agua y emulsión asfáltica, y también conocer sus variaciones en las propiedades mecánicas.
4. Partiendo de los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio, determinar y comparar las mejoras obtenidas con los diferentes porcentajes de emulsión asfáltica, y luego especificar cuál es el que mejores condiciones estructurales obtiene.

INTRODUCCIÓN

Partiendo de la necesidad de la calidad y mejora de la infraestructura del país, junto con la factibilidad de inversión, se plantea el estudio e investigación de una técnica de estabilización de suelos con emulsión asfáltica para el empleo en pavimentación. Básicamente se estudiará en suelos finos (arenas con presencia de limo o arcilla de la segunda clasificación en el sistema AASHTO, suelos limosos que son parte de la cuarta clasificación según el sistema AASHTO y limos con mayor plasticidad que forman parte de la quinta clasificación dentro del sistema AASHTO), utilizados como capas de subbase y base de carreteras, y también como revestimiento de vías de bajo volumen de tránsito, mejorando así su estado físico.

Este estudio de investigación técnica se realiza porque estos suelos regularmente son malos para trabajarlos estructuralmente, ya que por ser finos su plasticidad tiende a afectar la calidad estructural de los tramos asfálticos, haciendo que no sean muy resistentes a las cargas a que llegan a ser sometidos, presentando desacomodo de sus partículas y permitiendo un rompimiento o falla del suelo, lo cual puede dejarlos inservibles. Por lo tanto, los estudios de la estabilización se harán con el fin de mejorar su calidad estructural, es decir, disminuir la plasticidad y aumentar la resistencia con diferentes porcentajes de emulsión.

Se realizaron los ensayos considerables para determinar y conocer las características físicas y propiedades mecánicas de los suelos que se estabilizarán, como por ejemplo los debidos al suelo a estudiar, a la emulsión a estudiar y los que se debe hacer cuando ambos materiales estén combinados.

Cada uno de los ensayos necesarios a realizarse a dichos materiales se hará en los respectivos Laboratorios de Mecánica de Suelos y Asfaltos. El suelo que se necesita para ser estudiado en esta investigación debe ser fino para que se pueda reducir su plasticidad y mejorar sus condiciones estructurales, y sea funcional aplicar la técnica en campo. De este se debe conocer qué carga eléctrica posee, para determinar si la emulsión debe ser de carga positiva o negativa; a menudo deben ser de cargas opuestas para que tengan una mejor adherencia y proporcionen mejores resultados de resistencia y una mejor estabilidad.

1. CONOCIMIENTOS GENERALES

1.1. Antecedentes

Previamente a las emulsiones asfálticas se utilizaban dispersiones de alquitrán, con el empleo de este producto se obtuvo bastante experiencia, desarrollándose técnicas en la elaboración de las primeras pavimentaciones de las carreteras, y partiendo de estas técnicas se empezó a trabajar con las emulsiones asfálticas.

Las emulsiones han sido desarrolladas desde principios del siglo XX, la primera patente de una emulsión de betún fue autorizada en 1922, en ese entonces la utilización de las emulsiones era para que funcionaran como un ligante asfáltico, aplicándolo a temperatura ambiente para evitar calentarlo. Las emulsiones han sido comercializadas en distintos lugares y para diferentes usos, la utilización de las mismas fue creciendo relativamente despacio, el motivo de ello fue el tipo de emulsiones y la mala aplicación por falta de conocimiento, la constante investigación y mejoramiento de las mismas han logrado que en la actualidad exista una amplia gama de elección. Las primeras emulsiones fueron de característica aniónica; debido a su incremento de investigación y utilización apareció la emulsión de característica catiónica.

1.2. Cemento asfáltico

Es un material hidrocarburoado, ligante, de coloración marrón oscura a negra, está compuesto por betunes naturales o también por refinación del petróleo, que varía ampliamente en consistencia con la temperatura, debido a

que el mismo se encuentra en una variabilidad de proporciones en la mayoría del crudo de petróleo. La proporción de asfalto hace que los petróleos sean clasificados como:

- **Asfáltenos:** son petróleos crudos a base únicamente de asfalto.
- **Máltenos:** son petróleos crudos a base únicamente de parafina.
- **Petróleos crudos en base mixta,** es decir, que contienen bases de asfalto y parafina.

Una de las características del cemento asfáltico es cuando se calienta a altas temperaturas (140 °C aproximadamente) se ablanda y se vuelve líquido, cuando el material adquiere este fenómeno físico puede cubrir las partículas de agregado, así mismo se obtiene la producción en mezcla caliente.

1.2.1. Características y propiedades

Las propiedades del cemento asfáltico pueden ser físicas, mecánicas y también químicas, las cuales le permiten al material cierta trabajabilidad según las conveniencias del proyecto que se desea realizar.

1.2.1.1. Físicas

Las propiedades físicas deben ser innatas del material, lo cual permite al mismo ser flexible y sólido cuando está a temperatura ambiente, sus propiedades son:

- Insoluble en agua
- Color marrón oscuro a negro
- Olor característico

- Tensión superficial 70 Dinás/ cm a 77 °C
- Densidad de vapor 30 (aire = 1)
- Presión de vapor insignificante a temperatura ambiente
- Densidad de 1 – 1,05 g/cm³ a 25 °C (ASTM D-70)

1.2.1.2. Mecánicas

Las propiedades mecánicas son las más importantes debido a que con ellas se pretende mejorar la calidad del cemento asfáltico para prolongar la vida útil del material, son:

- Resistencia a la intemperie
- Ductilidad
- Elasticidad
- Adhesividad
- Penetración

1.2.1.3. Químicas

Las propiedades químicas son únicas y lo hacen muy versátil como material de construcción de carreteras. Los investigadores del mejoramiento del cemento asfáltico han ido logrando identificar y caracterizar las respectivas propiedades y utilizarlas, dentro de la estructura del pavimento, en la forma más ventajosa posible, pueden ser:

- Punto de ebullición > 470 °C
- Punto de inflamación > 230 °C (ASTM D-92)
- Autoinflamabilidad > 300 °C

1.2.2. Ensayos

Para analizar la calidad del cemento asfáltico se le realizan los respectivos ensayos enlistados a continuación:

- Penetración
- Viscosidad
- Punto de Inflamación
- Punto de reblandecimiento
- Ductilidad
- Solubilidad
- Penetración retenida después del ensayo de película delgada

Estos ensayos se le hacen siempre al material, con el objetivo de determinar un mejoramiento en las investigaciones constantes que se le aplican, alterando sus propiedades para que el mismo presente una buena calidad y un tiempo de vida útil prolongado.

1.3. Emulsiones asfálticas

Básicamente son una dispersión estabilizada de partículas de asfalto y agua. Como estos dos fluidos son inmiscibles, por medio de un emulgente se logra la disolución y mezcla de ambos.

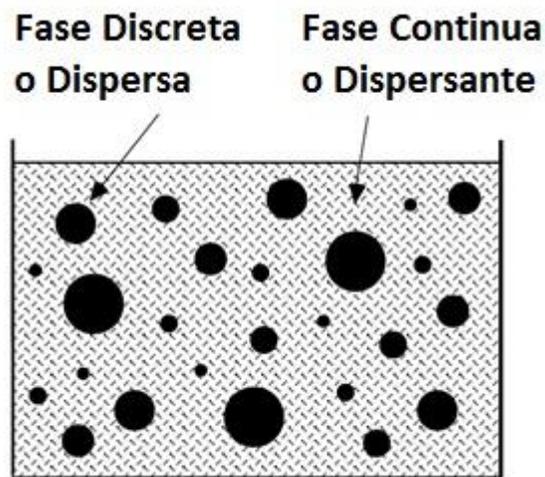
1.3.1. Emulsiones

Las emulsiones son sistemas formados por dos fases dentro de la mezcla del asfalto y el agua, las mismas pueden ser parcial o totalmente inmiscibles, estas formas se enlistan a continuación:

- Fase continua (o dispersante).
- Fase discreta (o dispersa): hay una dimensión lineal con respecto de su tamaño entre un nanómetro y una micra.

Un dato muy importante es que, por razones del tamaño diminuto de las partículas de las emulsiones, estas adquieren propiedades muy considerables, debido a ello a las emulsiones le interesan las moléculas y los sistemas macroscópicos para una mejor adherencia.

Figura 1. **Fases de la emulsión**



Fuente: RODRÍGUEZ TALAVERA, Rogelio. *Emulsiones asfálticas*. P. 15.

1.3.1.1. **Tipos de emulsiones**

Los tipos de emulsiones se clasifican por sus fases:

- Sistema de una fase: son formadas por macromoléculas en solución.
- Sistema de dos o más fases: son formadas por materia finamente dividida.

Las emulsiones se dividen en:

- Liofílicas/hidrofílicas: si la partícula tolera el solvente/agua
- Liofóbicas/hidrofóbicas: si la partícula no tolera el solvente/agua

1.3.1.2. Estabilidad de las emulsiones

La estabilidad en las emulsiones es muy importante para sus propiedades mecánicas en la estabilización de un suelo, el tipo de emulsiones que son estables en tiempo indefinido son las liofílicas, estas son termodinámicamente estables, debido a que las mismas tratan de separarse en dos fases con la intención de minimizar la energía libre superficial de Gibbs, esto al mismo tiempo las vuelve inestables. En las emulsiones el área superficial es directamente proporcional a la energía libre superficial de Gibbs, por consiguiente, las emulsiones liofóbicas son inestables.

Existe la floculación o coagulación y coalescencia, que sucede cuando las emulsiones comienzan a tener inestabilidad y las partículas empiezan a unirse, haciéndose estas aún más grandes y siendo llamadas agregados.

1.3.2. Emulsiones asfálticas

Las emulsiones asfálticas se componen de tres diferentes componentes básicos no miscibles: el cemento asfáltico, principalmente, agua y un agente emulsivo, siendo este último el ente para estabilizarlos en la fase continua y fase discreta. También podrían ser parte de estos componentes aditivos como

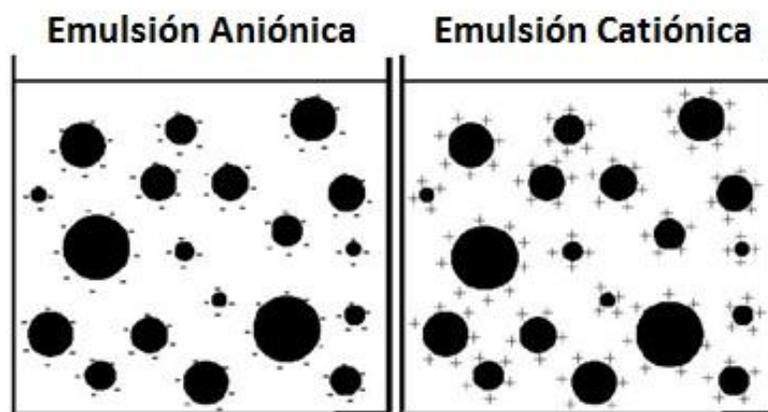
estabilizadores, mejoradores de adherencia, mejoradores de recubrimiento o agentes de control de rotura.

1.3.2.1. Tipos de emulsiones asfálticas

Partiendo de la carga eléctrica que poseen las emulsiones asfálticas se clasifican como:

- Emulsiones aniónicas: la emulsión aniónica (sales sódicas o potásicas de ácidos orgánicos de cadena compleja) es aquella en que la polaridad del emulsificante es de carga negativa y descarga en el ánodo ideal (ideales para agregados calizos que ionizan positivamente).
- Emulsiones catiónicas: la emulsión catiónica (producto de reacción de ácidos inorgánicos fuertes como ácidos clorhídricos, con aminas grasas), es aquella en que la polaridad del emulsificante es de carga positiva y descarga en el cátodo (ideal para agregados silíceos que se ionizan negativamente).

Figura 2. Tipos de emulsiones asfálticas



Fuente: RODRÍGUEZ TALAVERA, Rogelio. *Emulsiones asfálticas*. P. 19.

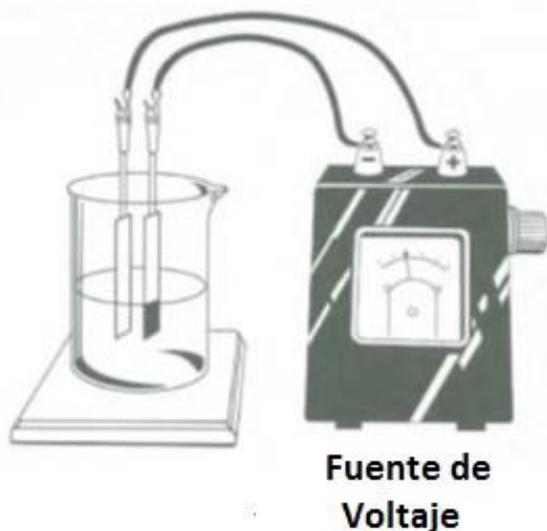
1.3.2.2. Ensayos de las emulsiones asfálticas

Las emulsiones asfálticas son sometidas a ensayos, pudiéndose clasificar, conocer sus características físico-químicas y sus propiedades mecánicas.

- Ensayo de carga de las partículas

La realización de este ensayo es con la finalidad de conocer la polaridad de la emulsión asfáltica, se toma una muestra de emulsión asfáltica y se le introduce un electrodo positivo (cátodo) y un electrodo negativo (ánodo). Los electrodos están conectados a una fuente eléctrica y, controlando su corriente, al finalizar el ensayo se observa el cátodo y, si hay presencia de asfalto en él, la emulsión asfáltica resulta ser catiónica.

Figura 3. **Ensayo de carga en las partículas**

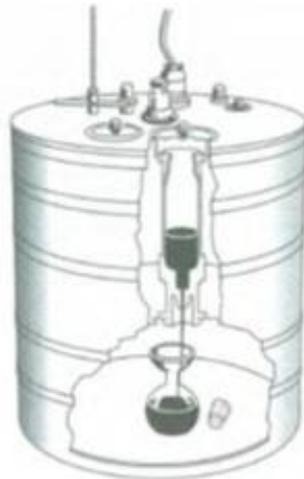


Fuente: Instituto del Asfalto. *Manual básico de emulsiones asfálticas*. P. 22.

- Viscosidad de la emulsión asfáltica

Para conocer la viscosidad de la emulsión asfáltica se realiza el ensayo de viscosidad Saybolt Furol, dependiendo de la emulsión asfáltica se realiza a una o dos temperaturas 25 °C (77 °F) o 50 °C (122 °F), el resultado se expresa en segundos Saybolt Furol.

Figura 4. **Ensayo de viscosidad Saybolt Furol**



Viscosímetro Saybolt

Fuente: Instituto del Asfalto. *Manual básico de emulsiones asfálticas*. P. 22.

- Ensayo de desemulsión

La finalidad de este ensayo es indicar la velocidad relativa en la que las partículas de asfalto coloidales de una emulsión asfáltica del tipo de rotura rápida llegan a romperse cuando se extienden finas películas sobre agregado o suelo.

Para una emulsión asfáltica aniónica, en una muestra de 100 g, debe provocarse una coalescencia a las partículas de asfalto con cloruro de calcio, este debe mezclarse rápidamente con agua y la emulsión asfáltica, luego se vierte en el tamiz 1,40 mm (No. 14) y se determina el grado de coalescencia. Las especificaciones determinan que en la mezcla de la solución la mínima cantidad de asfalto que debe ser retenido por el tamiz 1,40 mm (No. 14) usualmente es el 60 %.

- Ensayo de sedimentación

La finalidad del ensayo de sedimentación es detectar la tendencia de las partículas de asfalto a perder la estabilidad, esto se produce en el tiempo del almacenamiento de la emulsión. Esto le proporciona al consumidor un elemento de protección contra separaciones del asfalto y el agua en las emulsiones asfálticas inestables, durante cierto tiempo de almacenamiento.

Se debe colocar dos muestras de 500 ml en diferentes tubos de vidrio debidamente graduados, dejándolos tapados durante cinco días, posteriormente a ello se debe tomar pequeñas muestras de las partes inferior y superior de cada tubo, depositarlas en un frasco y pesarlas respectivamente. Calcular la diferencia de pesos con los resultados obtenidos, si en caso hay, entre el contenido de cemento asfáltico de las partes superior e inferior, proveyendo de esta manera una medida del asentamiento.

- Ensayo de la estabilidad para el almacenamiento

Este ensayo permite realizar determinaciones de estabilidad en un tiempo relativamente corto, este puede ser utilizado en vez del ensayo de asentamiento

con durabilidad de cinco días. Se deben colocar dos muestras de 500 ml en diferentes tubos de vidrio debidamente graduados, taparlos y dejar reposar por 24 horas, posteriormente se debe tomar las muestras de 50 g de las partes superior e inferior de cada tubo, depositar en distintos frascos, revolver y por último pesarlos.

Con los resultados se puede determinar el porcentaje promedio de residuos en las muestras de las partes superior e inferior de cada muestra, la diferencia calculada entre ambos porcentajes de residuos representa la estabilidad de almacenamiento.

- Ensayo de mezcla con cemento

Se realiza únicamente para las emulsiones asfálticas de rotura lenta en vez del de desemulsión, se especializa en las emulsiones de tipo catiónicas y aniónicas para asegurar que no se producirá una coalescencia rápida de las partículas de asfalto al contacto con suelos finos o agregados polvorientos.

Agregar 100 ml de emulsión asfáltica, diluida con agua en un 55 % de residuo, a una muestra de 50 g de cemento Portland de alta resistencia inicial, revolviéndolos. Se agrega más agua a la mezcla y se lava la muestra sobre un tamiz de 1,40 mm (No. 14), después se debe pesar el material retenido por el mismo.

- Ensayo de capacidad de recubrimiento y resistencia al agua

Al realizar este ensayo se busca un triple propósito, se determina la capacidad de una emulsión asfáltica para:

- Cubrir en totalidad el agregado.
- Soportar el mezclado evitando romper la película formada.
- Resistencia a la acción de lavado del agua después de completada la mezcla.

En la implementación de este ensayo se puede ayudar principalmente a la elección de emulsiones asfálticas óptimas para mezclar con agregados gruesos calcáreos. Se debe cubrir el agregado seleccionado con polvo de carbonato de calcio y mezclarse con la emulsión asfáltica, sobre un papel absorbente se debe colocar la mitad de la mezcla aproximadamente con el objetivo de examinar visualmente la superficie del agregado cubierta con emulsión asfáltica.

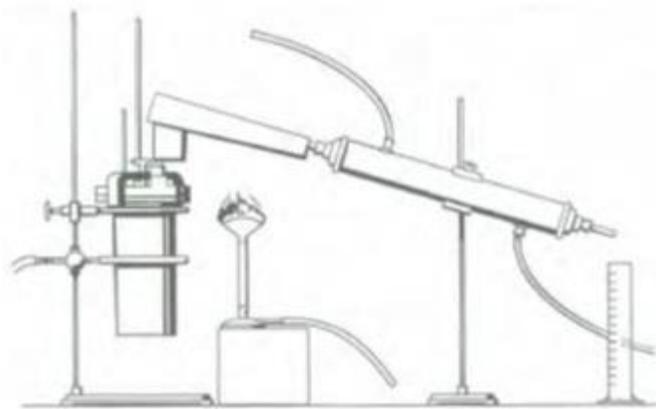
El resto de la mezcla debe ser lavada y enjuagada hasta que el agua salga clara, y del mismo modo colocar este material sobre un papel absorbente para evaluar el recubrimiento del mismo. Otra muestra se debe cubrir de agregado con polvo de carbonato de calcio, precedido de una mezcla con agua, para posteriormente agregar la emulsión asfáltica y con cierto cuidado mezclarse; por último, es útil realizar las mismas evaluaciones vistas previamente.

- Ensayo de destilación

Este ensayo se utiliza con el objetivo de determinar la proporción relativa de cemento asfáltico y agua presentes en la emulsión asfáltica, así como es posible obtener información sobre la cantidad de destilado de petróleo presente en ciertos tipos de emulsiones asfálticas. La temperatura final de destilación es de 250 °C (500 °F), se utiliza un alambique de aleación de acero o aluminio y calentadores de anillo, calentando 200 g de emulsión hasta alcanzar la temperatura final, manteniéndola durante 15 minutos para producir un residuo suave y homogéneo.

Si en caso se ensayaran emulsiones asfálticas catiónicas de rotura rápida o media que puedan incluir un destilado de petróleo, la cantidad máxima está limitada por sus especificaciones. El destilado y el agua se acoplan en sendas probetas graduadas para así determinar la cantidad de cada material.

Figura 5. **Ensayo de destilación para emulsiones asfálticas**



Tubo de Desprendimiento

Fuente: Instituto del Asfalto. *Manual básico de emulsiones asfálticas*. P. 25.

- Ensayo de tamiz

Este ensayo complementa al de sedimentación y su objetivo es equivalente, ya que se utiliza para establecer cuantitativamente el porcentaje de cemento asfáltico que forma glóbulos relativamente grandes, grumos o fibras que puedan obstruir los equipos y formar recubrimientos de asfalto no uniformes sobre las películas de agregado.

Se vierte 1000 g de emulsión asfáltica sobre un tamiz de 850 μm (No. 20), si en caso se ensayan emulsiones aniónicas se enjuagan el tamiz y el asfalto retenido con una solución suave de oleato de sodio, y con agua destilada, si por otro caso son emulsiones catiónicas, subsiguientemente se secan el tamiz y el asfalto en un horno, y se establece la cantidad relativa de asfalto retenido en el tamiz.

1.3.2.3. Rompimiento de las emulsiones asfálticas

Partiendo del tipo de rompimiento (estabilidad) que sufren las emulsiones asfálticas se clasifican como:

- Rompimiento rápido: estas tienen poca o nula capacidad para mezclarse con agregados, se emplean para riegos de sello, sellos de arena y tratamientos superficiales en general; para reaccionar rápidamente con el agregado y revertir al estado del asfalto, excepto la emulsión conocida como ECR-60.
- Rompimiento medio: designadas para ser mezcladas con agregados porque no rompen al instante de entrar en contacto con el agregado, son utilizadas para carpetas de mezcla en frío elaboradas en planta, principalmente cuando el contenido de finos es menor o igual al 2 %, además en trabajos de conservación tales como bacheos, renivelaciones y sobrecarpetas.
- Rompimiento lento: se diseñan para mezclarse con agregados finos, se utilizan comúnmente para carpetas asfálticas en frío elaboradas en planta y para estabilizaciones asfálticas, utilizadas en contenidos finos del 5 al 12 %.
- Para impregnación: estas emulsiones particularmente se utilizan para impregnaciones de subbases y/o bases hidráulicas.

- Superestables: estas principalmente se emplean en estabilizaciones de materiales y en trabajos de recuperación, utilizadas en contenidos finos mayores al 12 %.

Tabla I. **Clasificación de las emulsiones asfálticas de acuerdo a su tipo de rompimiento**

Clasificación	Contenido de cemento asfáltico en masa	Tipo	Polaridad
EAR-55	55	Rompimiento rápido	Aniónica
EAR-60	60		
EAM-60	60	Rompimiento medio	
EAM-65	65		
EAL-55	55	Rompimiento lento	
EAL-60	60		
EAI-60	60	Para imprimación	
ECR-60	60	Rompimiento rápido	Catiónica
ECR-65	65		
ECR-70	70		
ECM-65	65	Rompimiento medio	
ECL-65	65	Rompimiento lento	
ECI-60	60	Para imprimación	
ECS-60	60	Sobre-Estabilizada	

Fuente: RODRÍGUEZ TALAVERA, Rogelio. *Emulsiones asfálticas*. P. 24.

1.3.3. Emulsificantes

Son compuestos orgánicos de peso molecular relativamente elevado (entre 100 y 300); tienen una parte hidrofóbica, que es soluble en el medio orgánico que en este caso es el asfalto. Estos se componen generalmente por un radical alquilo R, el cual es hidrofóbico y un componente hidrofílico, que se encuentra saponificado y con el contacto con el agua se disocia, quedando con cargas negativas o positivas según sea el tipo de emulsificante. Este es el que define el

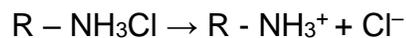
tipo de emulsión. Los emulsificantes aniónicos tienen grupos ácidos en su parte hidrofílica con carga eléctrica negativa, estos tienen como fórmula general:



Cuando este tipo de emulsificantes se encuentra en un medio acuoso se disocia, resultando:



Separándose del grupo carboxilato COO^- forma la parte hidrofílica, mientras que el radical alquilo R se queda en la parte hidrofóbica. Los emulsificantes catiónicos por lo general forman grupos aminos con carga eléctrica positiva, con fórmula general $R - \text{NH}_3\text{Cl}$. Cuando este tipo de emulsificante actúa en un medio acuoso se disocia, resultando:



Separándose del grupo amino NH_3^+ se va a la parte hidrofílica, mientras que el radical alquilo R se queda en la parte hidrofóbica. Los emulsificantes se sitúan en su mayor parte en la interfase de la producción de las emulsiones. Su parte hidrofóbica se dirige al asfalto y su parte polar hacia el agua. Con estos emulsificantes iónicos las partículas adquieren cargas eléctricas del mismo signo, repeliéndose entre ellos y estabilizando el sistema. Generalmente se requiere de más emulsificante para proveer buena estabilidad y las correctas propiedades de rendimiento, más del necesario para llenar la fase intermedia, de tal manera que las emulsiones asfálticas contienen emulsiones libres, presentes en soluciones como soluciones micelares en la fase acuosa, lo cual actúa como una reserva de emulsificante, ayudando a prevenir coalescencia durante la emulsificación,

almacenamiento y transporte. La molécula de un emulsificante es mucho más pequeña que una partícula de asfalto y cada partícula está estabilizada por miles de moléculas de emulsificantes.

Tabla II. **Porcentaje de emulsificante según el tipo de emulsión**

Tipo de emulsión	Emulsificante %	pH de emulsión	Tipo de emulsificante
Catiónica de ruptura rápida	0,15 – 0,25	2,0 – 4,0	Grasa diamina
Catiónica de ruptura media	0,30 – 0,60	1,5 – 4,0	Grasa diamina
Catiónica de ruptura lenta	0,80 – 2,00	2,0 – 5,0	Amina Cuaternaria
Aniónica de ruptura rápida	0,20 – 0,40	10,5 – 12,0	Resina ácida
Aniónica de ruptura media	0,40 – 0,80	10,5 -12,0	Resina ácida
Aniónica de ruptura lenta	1,20 – 2,50	7,5 -12,0	Lignosulfonato iónico

Fuente: elaboración propia.

1.4. Suelos finos de baja plasticidad

Los suelos son un conjunto de partículas minerales, los mismos son producto de la desintegración mecánica o de la descomposición química de las rocas, produciéndose durante un largo tiempo. Dentro de los suelos de granos finos se pueden considerar los limos y las arcillas con características o parámetros que los clasifican como suelos finos de baja plasticidad o suelos finos de alta plasticidad. Las arenas finas no poseen plasticidad, y dado el hecho que también son de grano fino pueden estudiarse para la estabilización con presencia de emulsión asfáltica.

1.4.1. Características

La característica principal que define a los suelos finos de poca plasticidad son los limos o las arcillas que poseen un límite líquido menor a 50, el límite líquido es necesario para clasificar los suelos dentro de la clasificación PRA de la AASHTO y en el Sistema de Clasificación Unificado, dentro de este se consideran los suelos enlistados a continuación:

- Arena fina

La arena fina es procedente de la denudación de las rocas, ya sea de una trituración artificial o no, no posee límite plástico, por lo tanto se considera no cohesivo.

- Limos

Este tipo de suelo por lo regular es de grano fino con poca o nula plasticidad, los mismos pueden ser derivados como limos inorgánicos que se producen en canteras, o bien, limos orgánicos que comúnmente se encuentran en los ríos.

- Arcillas

Las arcillas tienen la característica de que, al estar en presencia de humedad, pueden poseer cierto índice de plasticidad, el agua en la arcilla puede provocar que esta se contraiga o se expanda, todo dependiendo si también tiene presencias de grava, arena o limos.

1.4.2. Características y propiedades

Las propiedades de los suelos de baja plasticidad dependen mucho de tres factores muy importantes que son las características físicas y las propiedades mecánicas y químicas.

1.4.2.1. Físicas

Los suelos de baja plasticidad son aquellos que muestran poca cohesión en presencia de humedad, las partículas se adhieren con facilidad entre sí y pueden presentar poca moldeabilidad estando húmedos. Los terrenos secos tienen una cohesión apreciable, pero se pueden reducir a polvo con los dedos.

1.4.2.2. Mecánicas

La deformación de estos suelos en presencia de humedad puede notarse debido a que pueden agrietarse, pueden ser muy resistentes al poseer una cantidad de humedad óptima en condiciones de una compactación ideal, su falla es plástica e irreversible.

1.4.2.3. Químicas

Las mismas difieren en el tipo de suelo y el lugar en que se encuentren, debido a sus diversos componentes químicos interfieren en su ionización, lo cual puede volverlos suelos aniónicos o catiónicos, la carga eléctrica presentada por los suelos ayudará mucho para saber qué tipo de emulsión asfáltica utilizar.

1.4.3. Clasificación

Los suelos se clasifican por medio del sistema de clasificación unificado de clasificación de suelos SUCS y la clasificación PRA (AASHTO). Los suelos de baja plasticidad pueden pertenecer a las clasificaciones que son mencionadas a continuación:

- Clasificación PRA
 - A-2-4
 - A-2-5
 - A-3
 - A-4
 - A-5

- Sistema de Clasificación Unificado
 - SM (arena limosa)
 - ML (limo de baja compresibilidad)

1.5. Ensayos

- Granulometría según la norma AASTHO T-88
- Peso Unitario según la norma AASHTO T-19
- Gravedad Específica según la norma AASHTO T-85
- Equivalente de Arena según la norma AASHTO T-176
- Límites de Atterberg según las normas AASHTO T-89-10 y T-90-00
- Permeabilidad según la norma AASHTO T-215
- Proctor modificado según la norma AASHTO T-180-01

- CBR Valor Soporte California según la norma AASHTO T-193-99

1.6. Subbases y bases

Las subbases y bases son elementos estructurales muy importantes dentro de la construcción de carreteras, debido a que sobre ellas se aplica la carpeta de rodadura que soporta, transmite y distribuye uniformemente las cargas vehiculares. Estas pueden ser de materiales con plasticidad muy poca o nula, se utiliza el selecto, el cual es una arena de muy poca plasticidad por la presencia de partículas de limo. La base triturada se compone de un material seleccionado, que comúnmente es una arena limosa con agregado grueso de 3/8" o 1/2", así también puede ser el balasto, que en su mayoría es agregado grueso con poca presencia de finos.

Dependiendo de la carpeta de rodadura que se aplique es el diseño, especificaciones y tipos de subbases y bases a utilizar para que soporten las cargas vehiculares. Un factor muy importante es el Tránsito Promedio Diario Anual (TPDA) de vehículos.

1.6.1. Especificaciones

La capa de subbase o base común debe estar constituida por materiales de tipo granular en su estado natural o mezclados, que formen y produzcan un material que llene las especificaciones requeridas por las Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes impuestas por la Dirección General de Caminos.

- Material a estabilizar para subbase

Si se trata de una estabilización con material bituminoso, se admitirá un índice plástico hasta de 15, siempre que el producto del índice plástico por el porcentaje que pasa el tamiz 75 μ m (No. 200) sea menor de 72.

- Material a estabilizar para base

Los materiales a estabilizar para la capa de base deben consistir en piedra, grava o arena de río, solamente clasificadas sin triturar. Cuando así lo indiquen las Disposiciones Especiales, se puede requerir trituración parcial o total de la piedra o grava. En todo caso, los materiales pétreos pueden combinarse con material de relleno, en proporciones adecuadas para formar un material para estabilizar que llene los requisitos siguientes:

1.6.1.1. Calidad de los materiales

- El material debe poseer un CBR, AASHTO T 193, mínimo de 30, obtenido en una muestra que haya sido saturada a 95 % de compactación, AASHTO T 180.
- A lo referente a la grava, el tamaño máximo de la misma no debe exceder de 70 mm, ni de $\frac{1}{2}$ del espesor de la capa. No debe tener más del 50 % en peso de partículas que pasen el tamiz 0,425 mm, ni más del 25 % en peso de partículas que pasen el tamiz 0,075 mm.
- El porcentaje que pasa el tamiz 0,425 mm no debe tener un índice de plasticidad AASHTO T 90 mayor de 6, ni un límite líquido AASHTO T 89 mayor de 25.
- El equivalente de arena no debe ser menor de 30, determinado por el ensayo AASHTO T 176.

- Con respecto a materia orgánica, el material para la subbase y base debe estar exento de la misma, esto con el fin de que se produzcan fallas en la capa de rodadura.
- El material a Estabilizar debe ser uniforme en calidad y densidad y su peso unitario, determinado según AASHTO T 19, no debe ser menor de 80 lb/pie³ (1 280 kg/m³).
- Los materiales bituminosos deben llenar los requisitos señalados en la siguiente tabla, a menos que lo indiquen en otra forma las Disposiciones Especiales:

Tabla III. **Requisitos para los materiales bituminosos**

Tipo y grado de material bituminoso	Especificación	Temperatura de aplicación en°C
<ul style="list-style-type: none"> • Asfaltos Líquidos <ul style="list-style-type: none"> ○ MC 250 ○ SC 250 ○ MC 800 ○ SC 800 	<ul style="list-style-type: none"> • AASHTO M 82 • AASHTO M 141 • AASHTO M 82 • AASHTO M 141 	<ul style="list-style-type: none"> • 75-85 • 75-85 • 95-100 • 95-100
<ul style="list-style-type: none"> • Emulsiones Asfálticas <ul style="list-style-type: none"> ○ SS-1 ○ CSS-1 ○ SS 1h ○ CSS 1h 	<ul style="list-style-type: none"> • AASHTO M 140 • AASHTO M 208 • AASHTO M 140 • AASHTO M 208 	<ul style="list-style-type: none"> • 20-70 • 20-70 • 20-70 • 20-70

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. P. 307.

- En la estabilidad y flujo Marshall el material para subbase o base estabilizada con materiales bituminosos debe tener una resistencia mínima acorde al espesor de la capa, establecidos ambos en el diseño conforme se indique en las Disposiciones Especiales y en los planos. Cuando se usen asfaltos líquidos el ensayo Marshall se efectuará de

conformidad con AASHTO T 245. Cuando se usen emulsiones asfálticas se efectuará el ensayo Marshall modificado de conformidad con el Manual MS-19 del Instituto de Asfalto, el cual menciona que se determinan siguiendo los procedimientos de ASTM D 1559, comenzando con el párrafo 5, con la excepción de que los especímenes compactados serán colocados en un baño de aire por un mínimo de 2 horas a la temperatura de ensayo. Para la mayoría de los pavimentos con bajo a mediano volúmenes de tránsito, se ha encontrado que una estabilidad de 2 224 Newtons (500 lbf) o mayor es satisfactoria.

Tabla IV. **Especificaciones del ensayo Marshall**

Capa	No. Golpes	Resistencia en Newtons	Resistencia en Libras Fuerza
Subbase	50	2 224	500
Base	75	3 336	700

Fuente: elaboración propia.

1.6.2. Tipos de estabilizaciones

Las estabilizaciones asfálticas se pueden clasificar en dos formas, las cuales son físicas y químicas, cada una lleva un proceso diferente.

1.6.2.1. Estabilización física

Es la mezcla efectuada entre el material para la subbase o base, mezclandola con un porcentaje en peso de emulsión asfáltica, el porcentaje está calculado por el Método de Duriez, en el cual un factor muy importante es el porcentaje de humedad óptima, para que encajen la cantidad de agua necesaria y la que posee la emulsión asfáltica dentro de su composición interna.

1.6.2.2. Estabilización química

El enfoque de esta estabilización se encuentra en sí dentro de las cargas eléctricas entre el material y la emulsión, debido a que, si el suelo es catiónico, la emulsión a base de agua debe ser aniónica, si en caso el material es aniónico, la emulsión a estabilizar debe ser catiónica, también a base de agua, esto con el fin de que al mezclarse ambos materiales su aglomeración sea más resistente y del mismo modo poder evitar que sucedan fallas en el material estabilizado por las cargas vehiculares.

1.7. Estabilización con emulsión asfáltica

La estabilización del material con la emulsión asfáltica es una mezcla que debe realizarse en frío, el porcentaje de emulsión a aplicarse debe ser calculado según el peso del material y por el Método de Duriez.

1.7.1. Elaborado de la estabilización

Para conocer el porcentaje de emulsión que debe aplicarse al suelo debe hacerse un diseño de mezcla por el Método de Duriez, luego de obtener el porcentaje por peso de emulsión asfáltica se debe proceder a tener un peso de muestra y sobre eso aplicar la emulsión de manera uniforme para que la mezcla sea homogénea.

- Método de Duriez

Determinar porcentaje de emulsión a emplear a través del cálculo de la superficie específica del material (S) a la expresión:

$$\%L = K\sqrt[5]{S}$$

En donde:

L = % ligante residual, del que puede obtenerse de emulsión dividiendo por la concentración en tanto por uno.

K = módulo de riqueza; 3 – 4 para estabilizaciones.

S = superficie específica del material. Esta última se obtiene a través de la siguiente expresión:

$$S = \sum \frac{(\% \text{ retenido en tamiz} * F.S.E.)}{100}$$

Con los valores de F.S.E. (Factor de Superficie Específica) siguientes:

Tabla V. **Valores de F.S.E.**

% Retenido en tamiz ASTM	F.S.E.
3/4"	0,11
1/2"	0,16
3/8"	0,22
No. 4	0,35
No. 8	0,71
No. 30	1,99
No. 200	11,14
Pasa No. 200	130,0

Fuente: elaboración propia.

1.7.1.1. Manejo y almacenamiento de la emulsión asfáltica

El manejo y el almacenamiento de la emulsión asfáltica tienen sus especificaciones debido a la delicadeza del material derivado del petróleo.

- Almacenamiento

El recipiente que contiene a la emulsión debe estar aislado térmicamente, para protegerla contra el congelamiento y para un mejor aprovechamiento del calor.

- Almacenamiento de la emulsión igual que al agua entre 10 °C (50 °F) y 85 °C (185 °F).
- No permitir que la emulsión asfáltica sea calentada por encima de los 85 °C.
- No usar aire a presión para agitar la emulsión. Puede causar rotura de la emulsión.

- Manipulación de la emulsión

- Agitar suavemente durante el calentamiento para eliminar o reducir la formación de natas.
- Emplear bombas con apropiados pasos entre piezas para el manejo de emulsiones.
- Verificar, al diluir la emulsión, la compatibilidad del agua con esta, haciendo una prueba sobre una pequeña cantidad.
- Emplear, de ser posible, agua caliente para la dilución, y siempre agregar agua lentamente a la emulsión y no la emulsión al agua.

- Agitar aquellas emulsiones que han estado almacenadas de forma prolongada, esto puede hacerse por recirculación.
- No diluir emulsiones de rotura rápida en agua. Las emulsiones de rotura media y lenta pueden ser diluidas, pero siempre agregando lentamente agua a la emulsión asfáltica.

1.7.1.2. Preparación del suelo

El material debe ser mezclado homogéneamente, luego se debe tamizar por la malla No. 4, pesar una muestra necesaria para estabilizar, dependiendo el ensayo que se va a realizar a la muestra ya estabilizada, tomar en cuenta que es necesario tener en consideración el porcentaje de humedad actual de la muestra del suelo, así en el momento de aplicar la emulsión es necesario calcularlo para evitar que haya cambios significativos en el porcentaje óptimo de humedad del material para su compactación ideal.

1.7.1.3. Preparación de la emulsión asfáltica

Una vez ya calculado el porcentaje de emulsión asfáltica óptima por el Método de Duriez, dependiendo del peso de la muestra de suelo se calcula el volumen de emulsión asfáltica a aplicar a la muestra.

$$V_e = W_m * \frac{\%L}{100}$$

En donde:

V_e = volumen de emulsión en mililitros

W_m = peso del material

$\%L$ = porcentaje de emulsión

1.7.1.4. Aplicación de la emulsión asfáltica en tres diferentes cantidades a cada tipo de suelo

Previo a la aplicación de la emulsión al suelo se debe conocer el porcentaje de humedad actual de la muestra, también el porcentaje de agua de la composición de la emulsión, para así calcular el porcentaje faltante de agua para obtener la cantidad óptima de la misma.

$$V_{H1} = W_m * \frac{\%H_{op} - \%H_{ac}}{100}$$

$$V_{He} = V_e * \frac{\%H_e}{100}$$

$$V_{HR} = V_{H1} - V_{He}$$

En donde:

V_{H1} = volumen 1 de agua

W_m = peso del material

$\%H_{op}$ = porcentaje óptimo de agua

$\%H_{ac}$ = porcentaje actual de agua

V_{He} = volumen de emulsión asfáltica

$\%H_e$ = porcentaje de agua en la emulsión asfáltica

V_{HR} = volumen real de agua

Luego de tener el volumen real de agua y el volumen de emulsión a aplicar al material, se diluye el agua en la emulsión para que la mezcla sea uniforme, para posteriormente verterla al material y revolverlo bien hasta que el suelo y la emulsión presenten una mezcla homogénea.

Debido a que son tres suelos y también tres porcentajes diferentes de emulsión, se analizaron los resultados del Proctor modificado para conocer qué porcentaje de emulsión asfáltica ha brindado las condiciones óptimas de los mismos; conocido el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica, el resto de ensayos se han realizado con él para efectos de optimización de recursos.

1.7.1.5. Curado y protección

Después que las probetas a ensayar se elaboraron se deben curar, así mismo su protección. El curado va a depender del ensayo que se le realice a la probeta, debido a que en unos se debe sumergir en agua, como en el caso del CBR, y en otros solo al aire libre en lugares donde no llegue a perder su humedad, tal es el caso de las probetas del ensayo Marshall. Dentro de ambas situaciones, se debe evitar que sean golpeadas las probetas para evitar que se afecten las propiedades mecánicas.

1.7.1.6. Ensayos

Se deben realizar ensayos tanto del área de mecánica de suelos como del área de asfaltos, debido a que hay una combinación de ambas. Una es para conocer cómo se comporta el suelo en condiciones naturales y en condiciones estabilizadas, y la otra ya como parte asfáltica en la aplicación de cargas vehiculares. Los ensayos a efectuarse son:

- Granulometría según la norma AASTHO T-88.
- Peso unitario según la norma AASHTO T-19.
- Gravedad específica según la norma AASHTO T-85.
- Equivalente de arena según la norma AASHTO T-176.
- Límites de Atterberg según las normas AASHTO T-89-10 y T-90-00.

- Permeabilidad según la norma AASHTO T-215.
- Proctor modificado según la norma AASHTO T-180-01.
- Valor Soporte California (CBR) según la norma AASHTO T-193-99.
- Resistencia a la compresión no confinada de probetas según la norma ASTM D 1663-00.
- Estabilidad y flujo Marshall según la norma AASHTO T-245.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

A continuación se enumerarán cada uno de los ensayos, explicando la importancia de cada uno.

2.1. Muestras de suelo

Estos ensayos se realizan solo con el suelo en condiciones naturales.

2.1.1. Granulometría según la norma AASTHO T-88

Este ensayo tiene el objetivo de conocer la gradación del material, desde la grava y arena hasta el material fino. Se debe pesar una muestra de 500 mg de material seco, si la muestra posee demasiado material fino, debe ser lavada por el tamiz No. 200, posteriormente el que no pasa debe dejarse en un horno a una temperatura de 110 °C durante 24 hrs, para seguidamente verter la muestra en una batería de tamices y colocarla en una tamizadora durante 5 minutos, esto para que cada grano pase por cada malla de cada tamiz y se quede en el retenido para que después se pueda clasificar.

2.1.2. Peso unitario según la norma AASHTO T-19

La importancia de este ensayo es conocer el peso por unidad de volumen del material en sus condiciones naturales, puede ser compactado o suelto, en el compactado se utiliza una varilla de 5/8" de diámetro, lisa y con punta ovalada, en 3 capas de igual volumen con un apisonamiento de 25 veces en caída libre en cada capa. En un recipiente de volumen y peso conocido, se pesa el recipiente

con el material, luego se le resta el peso del recipiente para obtener el peso neto de la muestra y así calcular el peso unitario del suelo. En el caso del peso unitario suelto, solo se debe evitar la compactación del suelo con la varilla antes mencionada.

2.1.3. Gravedad según la norma AASHTO T-85

Conocer la gravedad específica de un suelo es necesario para calcular la relación de vacíos del mismo, también se puede predecir el peso unitario y graficar la recta de saturación máxima en el ensayo de compactación Proctor.

2.1.4. Equivalente de Arena según la norma AASHTO T-176

Este ensayo se realiza con el afán de saber el porcentaje relativo de finos-plásticos del contenido de los suelos, este ensayo también es posible realizarse en campo, no solo dentro de un laboratorio. Es un ensayo prioritario para una subbase o base.

2.1.5. Límites de Atterberg según las normas AASHTO T-89-10 y T-90-00

La importancia de este ensayo no solo es para la clasificación de los suelos, sino para conocer el límite líquido y límite plástico de los mismos, esto ayuda a evaluar las condiciones de los suelos, para ver si son aptos o no para subbases y bases, según las especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes.

2.1.6. Permeabilidad según la norma AASHTO T-215

El objetivo de este ensayo es conocer el coeficiente de permeabilidad del suelo, este coeficiente es una constante de proporcionalidad relacionada con la facilidad de movimiento de un flujo a través de un medio poroso, que se puede establecer por medio del porcentaje de vacíos que pueda tener el suelo en su compactación ideal. En carreteras, un suelo entre más permeable sea menos útil es, debido a que los suelos poseen una propiedad que con excesiva humedad pueden expandirse o contraerse y esto provoca fallas en las carpetas de rodadura.

2.1.7. Proctor modificado según la norma AASHTO T-180-01

Este ensayo tiene por finalidad compactar un suelo aumentando el peso volumétrico, por consiguiente, se aumenta la resistencia al corte y se mejora la estabilidad para soportar cargas de cimentaciones o carpetas de rodadura. Se disminuye la relación de vacíos o poros y, por ende, la permeabilidad en el suelo, y con ello se puede reducir los asentamientos y ya sea la expansión o contracción por congelamiento.

2.1.8. Valor Soporte California (CBR) según la norma AASHTO T-193-99

La importancia de este ensayo es determinar la capacidad de soporte de los suelos, conociendo la humedad óptima del suelo y en diferentes niveles de compactación variables. Con el valor de soporte conocido se mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones críticas de humedad y densidad controladas, así mismo, se puede calcular un porcentaje de la relación de soporte.

El porcentaje de CBR se define como la fuerza requerida para que un pistón normado penetre a una profundidad determinada, esta fuerza simula las cargas afectadas por la carpeta de rodadura y las cargas vehiculares en una determinada área. En un plazo de tiempo estas cargas pueden provocar fallas en la subbase o base.

2.2. Muestras de suelos estabilizados con emulsión asfáltica

Cuando el suelo se ha estabilizado con la emulsión asfáltica se deben realizar ciertos ensayos para conocer si el suelo mejora o empeora sus propiedades mecánicas, se vuelven a realizar algunos de los ensayos hechos con las condiciones naturales del suelo, solo que en este caso, como bien se mencionó, ya estabilizado con la emulsión asfáltica.

2.2.1. Resistencia a la compresión no confinada de probetas según la norma ASTM D 1663-00

El objetivo de este ensayo es conocer la resistencia del suelo a la falla por compresión no confinada sobre cargas controladas, claro que la densidad que debe poseer el suelo no es la de condiciones naturales, sino la densidad máxima obtenida en el ensayo de Proctor. Este valor indica la carga máxima que puede soportar el suelo en determinada área.

2.2.2. Estabilidad y flujo Marshall según la norma AASHTO T-245

Este ensayo está dirigido a medir la resistencia a la deformación del suelo ya estabilizado con la emulsión asfáltica, se realiza principalmente por conocer

el comportamiento de la emulsión en sí cuando el suelo ya está estabilizado. La fluencia mide la deformación bajo carga que ocurre en la emulsión asfáltica, en este caso:

- Límites de Atterberg
- Permeabilidad
- Proctor modificado
- CBR

3. CÁLCULOS EFECTUADOS PARA CADA ENSAYO

Los cálculos para estabilizar cada suelo dependen de cada ensayo efectuado a los mismos en condiciones naturales. La muestra 1 fue extraída de El Frutal, Villa Nueva; la muestra 2 proviene de la Aldea El Tablón, Villa Nueva; la muestra 3 se extrajo de El Encino, zona 6 de Mixco, las tres en Guatemala.

3.1. Muestras de suelos en condiciones naturales

Los cálculos presentados serán por referencia y constancia a lo realizado para lograr estabilizar los suelos, por este motivo solo se presentará el cálculo de la muestra 1.

3.1.1. Granulometría

- Porcentaje de grava

$$\%Grava = 100 - \% \text{ que pasa No. 4}$$

$$\%Grava = 100 - 97,47$$

$$\%Grava = 2,53$$

- Porcentaje de arena

$$\%Arena = \% \text{ que pasa No. 4} - \% \text{ que pasa No. 200}$$

$$\%Arena = 97,47 - 38,81$$

$$\%Arena = 58,66$$

- Porcentaje de finos

$$\%Finos = \% \text{ que pasa No. 200}$$

$$\%Finos = 38,81$$

3.1.2. Peso unitario

- Compactado

$$Peso \text{ Neto} = Peso \text{ Bruto} - Tara$$

$$Peso \text{ Neto} = 10,80 \text{ kg} - 3,72 \text{ kg}$$

$$Peso \text{ Neto} = 7,08 \text{ kg}$$

$$PU = \frac{Peso \text{ Neto}}{Volumen}$$

$$PU = \frac{7,08 \text{ kg}}{0,0070792 \text{ m}^3}$$

$$PU = 1000,11 \text{ kg/m}^3$$

- Suelto

$$Peso \text{ Neto} = Peso \text{ Bruto} - Tara$$

$$Peso \text{ Neto} = 10,42 \text{ kg} - 3,72 \text{ kg}$$

$$Peso \text{ Neto} = 6,70 \text{ kg}$$

$$PU = \frac{Peso \text{ Neto}}{Volumen}$$

$$PU = \frac{6,70 \text{ kg}}{0,0070792 \text{ m}^3}$$

$$PU = 946,43 \text{ kg/m}^3$$

3.1.3. Gravedad específica

$$G_s = \frac{W_s}{W_{mw} + W_s + W_{msw}}$$
$$G_s = \frac{99,88 \text{ g}}{674,82 \text{ g} + 99,88 \text{ g} - 729,63 \text{ g}}$$
$$G_s = 2,22$$

Donde:

G_s = Gravedad específica

W_s = Peso suelo seco

W_{mw} = Peso matraz + agua

W_{msw} = Peso matraz + suelo + agua

3.1.4. Equivalente de arena

$$EA = \frac{\text{Lectura de arena}}{\text{Lectura de arcilla}} \times 100$$
$$EA = \frac{1,1}{5,6} \times 100$$
$$EA = 19,6$$

3.1.5. Límites de Atterberg

Al no presentar plasticidad los suelos, el índice de plasticidad (IP) es igual a cero y el límite líquido también es cero.

3.1.6. Permeabilidad

$$a = \frac{V_{salida}}{h_1 - h_2}$$
$$a = \frac{5,94 \text{ cm}^3}{222 \text{ cm} - 217,13 \text{ cm}}$$
$$a = 1,27 \text{ cm}^2$$

$$k = \frac{aL}{At} \ln \frac{h_1}{h_2}$$
$$k = \frac{(1,27 \text{ cm}^2)(11,63 \text{ cm})}{(81,10 \text{ cm}^2)(7\ 200 \text{ s})} \ln \frac{222 \text{ cm}}{217,13 \text{ cm}}$$
$$k = 5,387 \times 10^{-7}$$
$$k_{20^\circ\text{C}} = 5,387 \times 10^{-7}$$

Donde:

k = coeficiente de permeabilidad.

a = área de la sección transversal de la bureta o tubería de entrada.

A = área seccional de la muestra de suelo.

h₁ = cabeza hidráulica a través de la muestra al comienzo del experimento.

h₂ = cabeza hidráulica a través de la muestra al final del ensayo.

L = longitud de la muestra.

t = tiempo transcurrido para que la carga hidráulica pase de h₁ a h₂.

ln = logaritmo natural.

3.1.7. Proctor modificado

$$PNH = PBH - tara$$

$$PNH = 5,35 \text{ kg} - 4,18 \text{ kg}$$

$$PNH = 1,17 \text{ kg}$$

$$PUH = \frac{PNH * (\frac{2,205lb}{1kg})}{\frac{1}{30}pie^3}$$

$$PUH = \frac{1,17 * (\frac{2,205lb}{1kg})}{\frac{1}{30}pie^3}$$

$$PUH = 77,40 \text{ lb}/pie^3$$

- Tarro 1

$$dif = PBH - PBS$$

$$dif = 82,66 \text{ g} - 76,14 \text{ g}$$

$$dif = 6,52 \text{ g}$$

$$PNS = PBS - tara$$

$$PNS = 76,14 \text{ g} - 24,41 \text{ g}$$

$$PNS = 51,73 \text{ g}$$

$$\%H = \frac{dif}{PNS} \times 100$$

$$\%H = \frac{6,52 \text{ g}}{51,73 \text{ g}} \times 100$$

$$\%H = 12,60$$

- Tarro 2

$$dif = PBH - PBS$$

$$dif = 69,93 \text{ g} - 64,41 \text{ g}$$

$$dif = 5,52 \text{ g}$$

$$PNS = PBS - tara$$

$$PN = 64,41 \text{ g} - 20,22 \text{ g}$$

$$PNS = 44,19 \text{ g}$$

$$\%H = \frac{dif}{PNS} \times 100$$

$$\%H = \frac{5,52 \text{ g}}{44,19 \text{ g}} \times 100$$

$$\%H = 12,49$$

$$\%H_{promedio} = \frac{\%H_1 + \%H_2}{2}$$

$$\%H_{promedio} = \frac{12,60 + 12,49}{2}$$

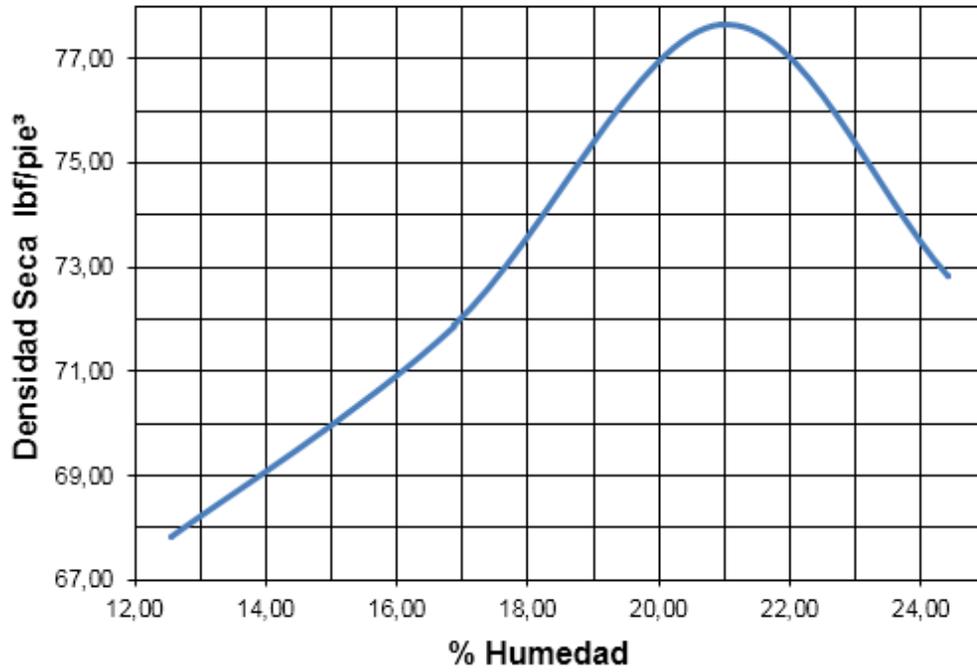
$$\%H_{promedio} = 12,55$$

$$PUS = \frac{PUH}{100 + \%H_{promedio}}$$

$$PUS = \frac{77,40 \text{ lb}/\text{pie}^3}{100 + 12,55}$$

$$PUS = 68,77 \text{ lb}/\text{pie}^3$$

Figura 6. Densidad seca-húmeda relativa



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

$$PUS \text{ máx} = 77,66 \text{ lb/pe}^3$$

$$\%H_{\text{optima}} = 20,95$$

Donde:

PNH = peso neto húmedo

PBH = peso bruto húmedo

PUH = peso unitario húmedo

PBS = peso bruto seco

PNS = peso neto seco

PUS = peso unitario seco

%H = porcentaje de humedad

3.1.8. CBR

- Para 65 golpes

$$\%E = \frac{E}{4,583} X 100$$

$$\%E = \frac{0,09}{4,583} X 100$$

$$\%E = 0,20$$

$$\%C = \frac{PUS_{CBR}}{PUS_{proctor}} X 100$$

$$\%C = \frac{77,40 \text{ lb}/\text{pie}^3}{77,66 \text{ lb}/\text{pie}^3} X 100$$

$$\%C = 99,7 \text{ lb}/\text{pie}^3$$

- Para 30 golpes

$$\%E = \frac{E}{4,583} X 100$$

$$\%E = \frac{0,08}{4,583} X 100$$

$$\%E = 0,17$$

$$\%C = \frac{PUS_{CBR}}{PUS_{proctor}} X 100$$

$$\%C = \frac{72,99 \text{ lb}/\text{pie}^3}{77,66 \text{ lb}/\text{pie}^3} X 100$$

$$\%C = 93,98 \text{ lb}/\text{pie}^3$$

- Para 10 golpes

$$\%E = \frac{E}{4.583} X 100$$

$$\%E = \frac{0,14}{4,583} X 100$$

$$\%E = 0,31$$

$$\%C = \frac{PUS_{CBR}}{PUS_{proctor}} X 100$$

$$\%C = \frac{69,29 \text{ lb}/\text{pie}^3}{77,66 \text{ lb}/\text{pie}^3} X 100$$

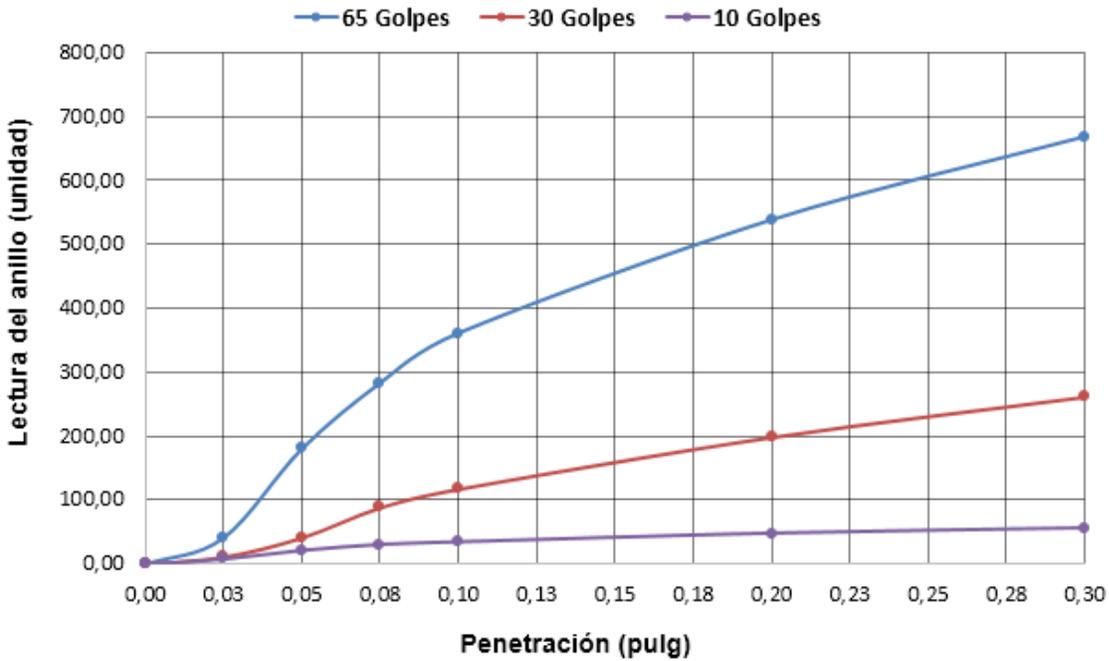
$$\%C = 89,22 \text{ lb}/\text{pie}^3$$

Donde:

$\%E$ = porcentaje de expansión

$\%C$ = porcentaje de compactación

Figura 7. Curva de penetración



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

- Para 65 golpes

$$\%CBR = \frac{\text{carga unitaria del ensayo}}{\text{carga unitaria patrón}} \times 100$$

$$\%CBR_{0,1"} = \frac{605,01 \text{ lb}}{1\ 000 \text{ lb}} \times 100$$

$$\%CBR_{0,1"} = 60,50$$

$$\%CBR_{0,2"} = \frac{897,49 \text{ lb}}{1\ 500 \text{ lb}} \times 100$$

$$\%CBR_{0,2"} = 59,83$$

- Para 30 golpes

$$\%CBR = \frac{\text{carga unitaria del ensayo}}{\text{carga unitaria patrón}} \times 100$$

$$\%CBR_{0.1"} = \frac{197,84 \text{ lb}}{1\ 000 \text{ lb}} \times 100$$

$$\%CBR_{0.1"} = 19,78$$

$$\%CBR_{0.2"} = \frac{333,51 \text{ lb}}{1\ 500 \text{ lb}} \times 100$$

$$\%CBR_{0.2"} = 22,23$$

- Para 10 golpes

$$\%CBR = \frac{\text{carga unitaria del ensayo}}{\text{carga unitaria patrón}} \times 100$$

$$\%CBR_{0.1"} = \frac{58,34 \text{ lb}}{1\ 000 \text{ lb}} \times 100$$

$$\%CBR_{0.1"} = 5,83$$

$$\%CBR_{0.2"} = \frac{80,19 \text{ lb}}{1\ 500 \text{ lb}} \times 100$$

$$\%CBR_{0.2"} = 5,35$$

3.2. Muestras de suelos estabilizados con emulsión asfáltica

Las muestras de suelos se estabilizan por medio del Método de Duriez, el cual tiene como resultado el porcentaje de emulsión a utilizar en el suelo según los resultados obtenidos en la granulometría. Con respecto a la muestra 1, el porcentaje de emulsión asfáltica calculada a utilizar es de 7,58 %.

- Método de Duriez

$$S = \sum \frac{(\% \text{ retenido en tamiz} * F.S.E.)}{100}$$

$$S = \sum \frac{(4\,775,02)}{100}$$

$$S = 47,7502$$

$$\%L = K\sqrt[5]{S}$$

$$\%L = (3,5)\sqrt[5]{47,7502}$$

$$\%L = 7,58$$

Como resultado se obtiene un 7,58 % de emulsión asfáltica por el peso del material a estabilizar.

- Estabilización del suelo con emulsión asfáltica

$$V_e = W_m * \frac{\%L}{100}$$

$$V_e = 2\,500 \text{ g} * \frac{7,58}{100}$$

$$V_e = 189,58 \text{ ml}$$

$$V_{H1} = W_m * \frac{\%H_{op} - \%H_{ac}}{100}$$

$$V_{H1} = 2\,500 \text{ g} * \frac{20,95 - 2,61}{100}$$

$$V_{H1} = 458,5 \text{ ml}$$

$$V_{He} = V_e * \frac{\%H_e}{100}$$

$$V_e = 189,58 \text{ ml} * \frac{40}{100}$$

$$V_{He} = 75,83 \text{ ml}$$

$$V_{HR} = V_{H1} - V_{He}$$

$$V_{HR} = 458,5 \text{ ml} - 75,83 \text{ ml}$$

$$V_{HR} = 382,67 \text{ ml}$$

Como resultado se obtiene que por 2,50 kg de material se debe utilizar 382,67 ml de agua y 189,58 ml de emulsión.

3.2.1. Resistencia a la compresión no confinada de probetas

Las probetas ensayadas en un laboratorio pueden presentar distintos datos debido a la función matemática en que trabajen, pero algo muy importante a tomar en cuenta es la variación del área transversal de la probeta mientras va aumentando la fuerza de compresión.

$$A_{corregida} = \frac{a_{probeta}}{1 - \frac{\% \epsilon}{100}}$$

$$A_{corregida} = \frac{31,67 \text{ cm}^2}{1 - \frac{2}{100}}$$

$$A_{corregida} = 32,316 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{axial} = \frac{F * 10}{A_{corregida}}$$

$$\sigma_{axial} = \frac{10,4762 \text{ kg} * 10}{32,316 \text{ cm}^2}$$

$$\sigma_{axial} = 3,242 \text{ Ton/m}^2$$

3.2.2. Estabilidad y flujo Marshall

Tabla VI. Estabilidad y flujo Marshall de la muestra 1 estabilizada

Probeta	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Peso (g)	Carga (lbf)	Carga Prom (lbf)	Defor. (0.01 plg)	Defor. Prom (0.01 plg)
1	102,09	72,00	910,31	100	132,67	10	10,33
2	101,87	70,09	921,81	107		11	
3	101,74	70,09	947,12	191		10	

Fuente: elaboración propia.

$$\text{Relación Estabilidad – Fluencia} = \frac{\text{Estabilidad}}{\text{Fluencia}}$$

$$\text{Relación Estabilidad – Fluencia} = 12,84$$

3.3. Resultados obtenidos

De los ensayos realizados para conocer el comportamiento de los suelos en sus condiciones naturales y en condiciones estabilizadas, se obtuvieron datos para ser calculados y poder realizar comparaciones de sus comportamientos.

3.3.1. Muestras de suelos en condiciones naturales

Las muestras de suelos analizadas fueron tres diferentes en todo sentido, después de elaborar los ensayos en condiciones naturales, se les realizaron otros ensayos ya estando los suelos estabilizados, se aplicaron tres diferentes cantidades de emulsión, el primer porcentaje se calculó mediante el Método de Duriez, los otros dos porcentajes de emulsión asfáltica restantes se determinaron por criterio propio de una variación de un $\pm 2\%$, esto con el objetivo de conocer también qué variabilidad se pudiese presentar con el porcentaje teórico.

3.3.1.1. Granulometría

Este ensayo se realizó solo en condiciones naturales, para conocer la gradación de los suelos y su clasificación.

- Muestra 1

Es una arena limosa color café oscuro, extraída de El Frutal, Villa Nueva, Guatemala.

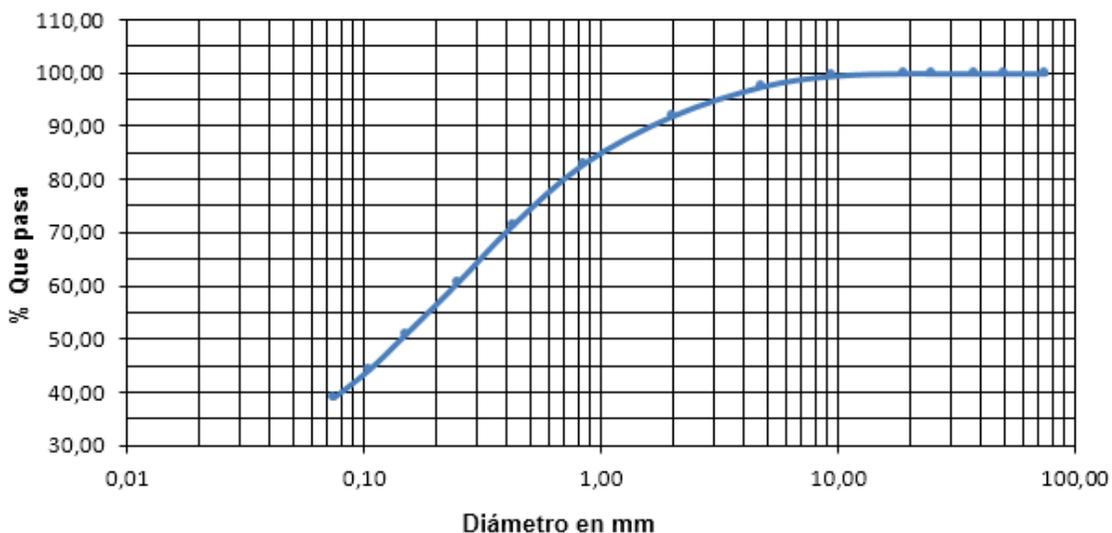
- Peso bruto seco en gramos: 699,85 g.
- Tara en gramos: 168,10 g.
- Peso neto seco: 531,75 g.

Tabla VII. **Granulometría de la muestra 1**

Tamiz	Abertura	Peso Bruto g	Tara g	Peso Neto g Que pasa	Por Ciento Que pasa
		493,49	168,10	325,39	100,00
3"	75,00 mm	493,49	168,10	325,39	100,00
2"	50,00 mm	493,49	168,10	325,39	100,00
1 1/2"	37,50 mm	493,49	168,10	325,39	100,00
1"	25,00 mm	493,49	168,10	325,39	100,00
3/4"	19,00 mm	493,49	168,10	325,39	100,00
3/8"	9,50 mm	491,01	168,10	322,91	99,53
4	4,75 mm	480,05	168,10	311,95	97,47
10	2,00 mm	450,50	168,10	282,40	91,92
20	850,00 mm	402,93	168,10	234,83	82,97
40	425,00 mm	340,97	168,10	172,87	71,32
60	250,00 mm	283,75	168,10	115,65	60,56
100	150,00 mm	231,26	168,10	63,16	50,69
140	106,00 mm	196,50	168,10	28,40	44,15
200	75,00 mm	-	168,10	206,36	38,81

Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Granulometría de la muestra 1**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

- **Muestra 2**

Es una arena limosa color café, proviene de Aldea El Tablón, Villa Nueva, Guatemala.

- Peso bruto seco en gramos: 756,74 g.
- Tara en gramos: 162,69 g.
- Peso neto seco: 594,05 g.

Tabla VIII. **Granulometría de la muestra 2**

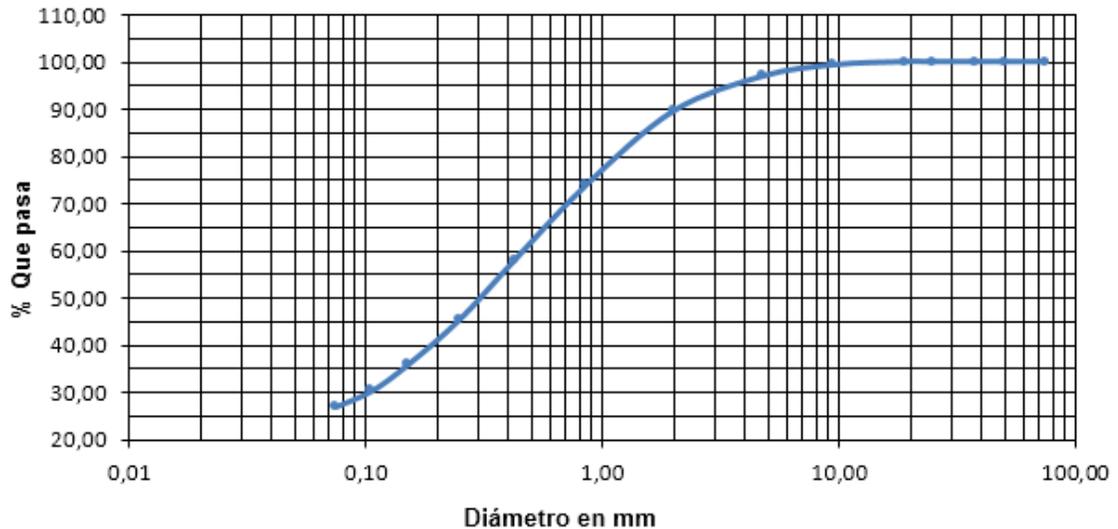
Tamiz	Abertura	Peso Bruto g	Tara g	Peso Neto g Que pasa	Por Ciento Que pasa
		596,10	162,69	433,41	100,00

Continuación de tabla VIII

3"	75 mm	596,10	162,69	433,41	100,00
2"	50 mm	596,10	162,69	433,41	100,00
1 1/2"	37.5 mm	596,10	162,69	433,41	100,00
1"	25 mm	596,10	162,69	433,41	100,00
3/4"	19.0 mm	596,10	162,69	433,41	100,00
3/8"	9.5 mm	592,12	162,69	429,43	99,33
4	4.75 mm	577,78	162,69	415,09	96,92
10	2.00 mm	534,15	162,69	371,46	89,57
20	850 mm	440,48	162,69	277,79	73,80
40	425 mm	346,56	162,69	183,87	57,99
60	250 mm	272,34	162,69	109,65	45,50
100	150 mm	214,81	162,69	52,12	35,82
140	106 mm	182,40	162,69	19,71	30,36
200	75 mm	-	162,69	160,64	27,04

Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Granulometría de la muestra 2**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

- Muestra 3

Este suelo es un limo arenoso color café claro con presencia de grava. Se extrajo de El Encino, zona 6 de Mixco, Guatemala.

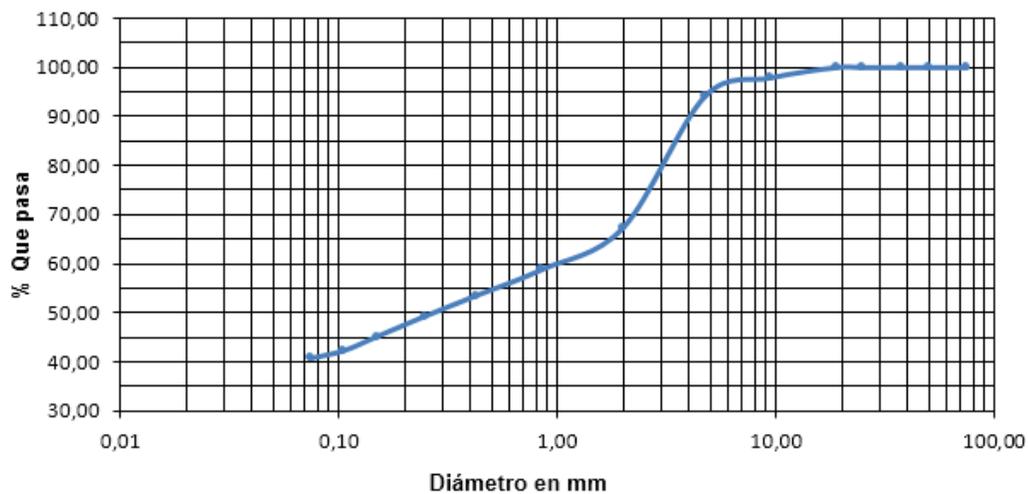
- Peso bruto seco en gramos: 543,03 g.
- Tara en gramos: 97,27 g.
- Peso neto seco: 445,76 g.

Tabla IX. **Granulometría de la muestra 3**

Tamiz	Abertura	Peso Bruto g	Tara g	Peso Neto g Que pasa	Por Ciento Que pasa
		362,17	97,27	264,90	100,00
3"	75 mm	362,17	97,27	264,90	100,00
2"	50 mm	362,17	97,27	264,90	100,00
1 1/2"	37.5 mm	362,17	97,27	264,90	100,00
1"	25 mm	362,17	97,27	264,90	100,00
3/4"	19.0 mm	352,79	97,27	255,52	97,90
3/8"	9.5 mm	335,94	97,27	238,67	94,12
4	4.75 mm	271,20	97,27	173,93	79,59
10	2.00 mm	215,92	97,27	118,65	67,19
20	850 µm	177,98	97,27	80,71	58,68
40	425 µm	154,22	97,27	56,95	53,35
60	250 µm	135,79	97,27	38,52	49,21
100	150 µm	117,04	97,27	19,77	45,01
140	106 µm	104,32	97,27	7,05	42,15
200	75 µm	-	97,27	180,86	40,57

Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Granulometría de la muestra 3**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

3.3.1.2. **Peso unitario**

- Muestra 1
 - Peso específico del suelo apisonado: 1 000,11 kg/m³
 - Peso específico del suelo suelto: 946,43 kg/m³

- Muestra 2
 - Peso específico del suelo apisonado: 887,11 kg/m³
 - Peso específico del suelo suelto: 850,38 kg/m³

- Muestra 3
 - Peso específico del suelo apisonado: 991,64 kg/m³

- Peso específico del suelo suelto: 954,91 kg/m³

Nota: las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos no especifican si el peso específico de 1 280 kg/m³ es con suelo apisonado o suelto.

3.3.1.3. Gravedad específica

Tabla X. Gravedad específica

MUESTRA	COLOR	GRAVEDAD ESPECÍFICA
1	Café	2,25
2	Café	2,08
3	Café	1,76

Fuente: elaboración propia.

3.3.1.4. Equivalente de arena

Tabla XI. Equivalente de arena

MUESTRA	PROBETA	LECTURA DE ARENA	LECTURA DE FINOS
1	1	1,1	5,6
	2	1,1	5,7
2	1	3,4	5,6
	2	2,9	5,4
3	1	3,5	6,7
	2	3,4	6,8

Fuente: elaboración propia.

3.3.1.5. Límites de Atterberg

Se mostrarán los resultados de plasticidad de los ensayos efectuados de los suelos en condiciones naturales.

- Muestra 1

No presenta plasticidad.

- Muestra 2

No presenta plasticidad.

- Muestra 3

Tabla XII. Límites de Atterberg de la muestra 3

Descripción:	Limo Arenoso de Alta Plasticidad Color Café Claro con Presencia de Grava					
Ensayo	Humedad natural		Límite líquido		Límite plástico	
Golpes			18			
Tarro			A-39	A-14	A-10	A-55
PBH g			38,32	33,13	32,63	36,26
PBS g			33,27	27,97	28,50	32,41
Tara g			24,49	18,98	20,33	24,80
Diferencia g			5,05	5,16	4,13	3,85
PNS g			8,78	8,99	8,17	7,61
Humedad			57,52	57,40	50,55	50,59
Promedio			57,46		50,57	

Fuente: elaboración propia.

3.3.1.6. Permeabilidad

Este ensayo también es necesario realizarse en condiciones naturales y en condiciones estabilizadas, así mismo es útil verificar si la emulsión asfáltica al ser aplicada puede generar cambios físicos.

- Muestra 1

Tabla XIII. Permeabilidad de la muestra 1

Ensayo No.	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	t (seg)	a (cm ²)	V _{in} (cm ³)	V _{out} (cm ³)	T (°C)	kT	ηT/η20	k20°C
1	222,0	216,0	7 200	1,00	6,00	6,00	20	5,46E-07	1	5,459E-07
2	222,0	218,0	7 200	1,50	6,00	6,00	20	5,43E-07	1	5,434E-07
3	222,0	218,0	7 200	1,69	6,75	6,75	20	6,11E-07	1	6,113E-07
4	222,0	216,5	7 200	0,91	5,00	5,00	20	4,54E-07	1	4,544E-07
Promedio:	222,0	217,13	7 200	1,27	5,94	5,94	20	5,63E-07	1	5,635E-07

Fuente: elaboración propia.

- Muestra 2

Tabla XIV. Permeabilidad de la muestra 2

Ensayo No.	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	t (seg)	a (cm ²)	V _{in} (cm ³)	V _{out} (cm ³)	T (°C)	kT	ηT/η20	k20°C
1	238,5	222,0	390	0,36	6,00	6,00	20	9,59E-06	1	9,589E-06
2	238,5	230,5	240	0,50	4,00	4,00	20	1,02E-05	1	1,020E-05
3	238,5	234,0	180	0,89	4,00	4,00	20	1,35E-05	1	1,349E-05
Promedio:	238,5	228,83	270	0,58	4,00	2,80	12	1,28E-05	1	1,284E-05

Fuente: elaboración propia.

- Muestra 3

Tabla XV. **Permeabilidad de la muestra 3**

Ensayo No.	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	t (seg)	a (cm ²)	V _{in} (cm ³)	V _{out} (cm ³)	T (°C)	kT	ηT/η20	k20°C
1	238,5	222,0	390	0,36	6,00	6,00	20	9,59E-06	1	9,589E-06
2	238,5	230,5	240	0,50	4,00	4,00	20	1,02E-05	1	1,020E-05
3	238,5	234,0	180	0,89	4,00	4,00	20	1,35E-05	1	1,349E-05
Promedio:	238,5	228,8	270	0,58	4,00	2,80	12	1,28E-05	1	1,284E-05

Fuente: elaboración propia.

3.3.1.7. Proctor modificado

Este ensayo es muy importante, debido a que a partir de este se toman los porcentajes óptimos tanto de humedad como de emulsión, con el fin de obtener la máxima compactación del suelo.

- Muestra 1

Tabla XVI. **Proctor modificado de la muestra 1**

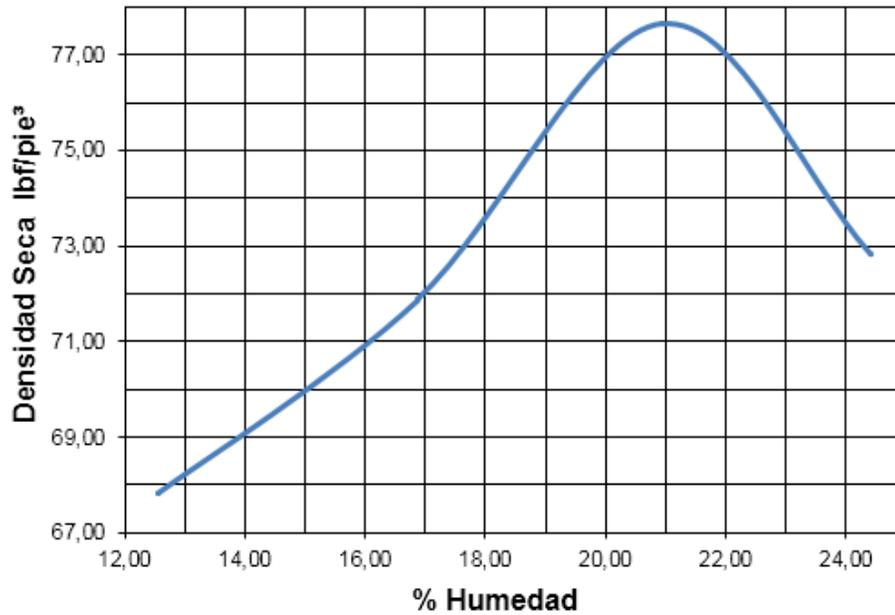
No. de Columna:	1		2		3		4	
Intervalo de Humedad en %:	8		12		16		20	
PBH	5,35		5,45		5,60		5,55	
Tara	4,18		4,18		4,18		4,18	
PNH	1,17		1,27		1,42		1,37	
PUH	77,40		84,01		93,93		90,63	
Tarro	A-14	A-53	M-2	C-12	C-17	C-19	A-33	C-6
PBH	82,66	69,93	68,27	62,50	82,14	83,80	73,33	69,86
PBS	76,14	64,41	61,27	56,20	72,19	73,45	63,84	60,05
Tara	24,41	20,22	19,77	18,89	24,63	24,13	24,55	20,31
Diferencia	6,52	5,52	7,00	6,30	9,95	10,35	9,49	9,81
PNS	51,73	44,19	41,50	37,31	47,56	49,32	39,29	39,74

Continuación de tabla XVI

% De Humedad	12,60	12,49	16,87	16,89	20,92	20,99	24,15	24,69
% De Humedad Promedio	12,55		16,88		20,95		24,42	
PUS	68,77		71,88		77,66		72,84	

Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Proctor modificado de la muestra 1**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

- Muestra 2

Tabla XVII. **Proctor modificado de la muestra 2**

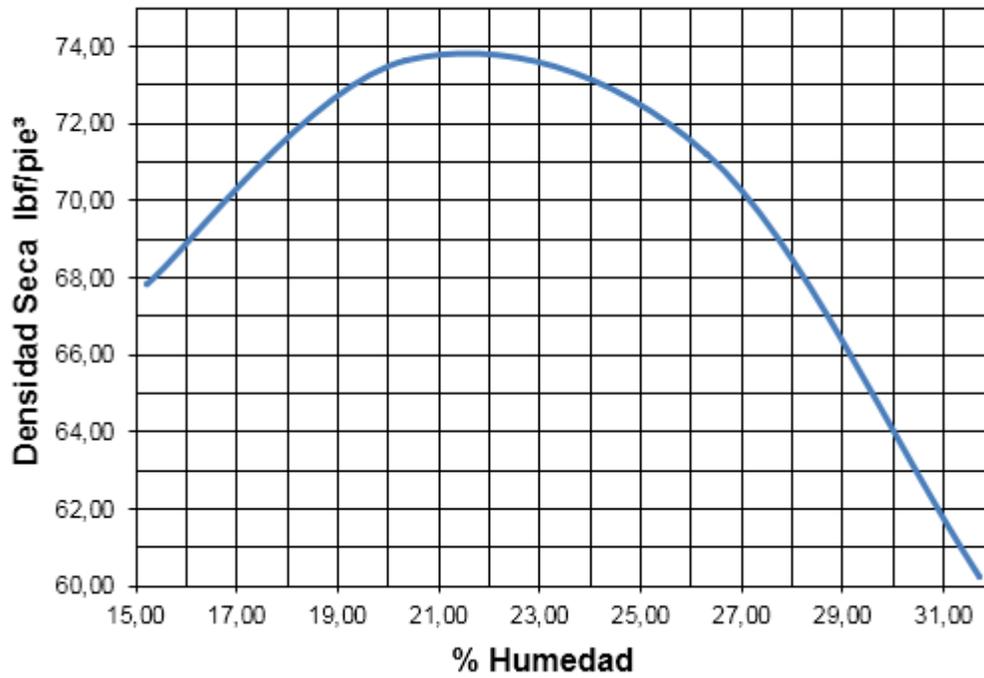
No. de Columna:	1	2	3	4
Intervalo de Humedad en %:	5	10	15	20

Continuación de tabla XVII

PBH	5,32	5,52	5,54	5,38				
Tara	4,18	4,18	4,18	4,18				
PNH	1,14	1,34	1,36	1,2				
PUH	75,41	88,64	89,96	79,38				
Tarro	A-14	A-53	M-2	C-12	C-17	C-19	A-33	C-6
PBH	60,05	69,10	63,38	73,26	86,10	84,48	104,90	94,44
PBS	54,70	63,16	56,78	65,14	73,31	72,04	85,73	77,43
Tara	18,97	24,72	24,69	24,86	24,75	24,67	24,99	24,04
Diferencia	5,35	5,94	6,60	8,12	12,79	12,44	19,21	17,01
PNS	35,73	38,44	32,09	40,28	48,56	47,37	60,74	53,39
% De Humedad	14,97	15,45	20,57	20,16	26,34	26,26	31,63	31,86
% De Humedad Promedio	15,21	20,36	26,30	31,74				
PUS	65,45	73,64	71,23	60,25				

Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Proctor Modificado de la muestra 2**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

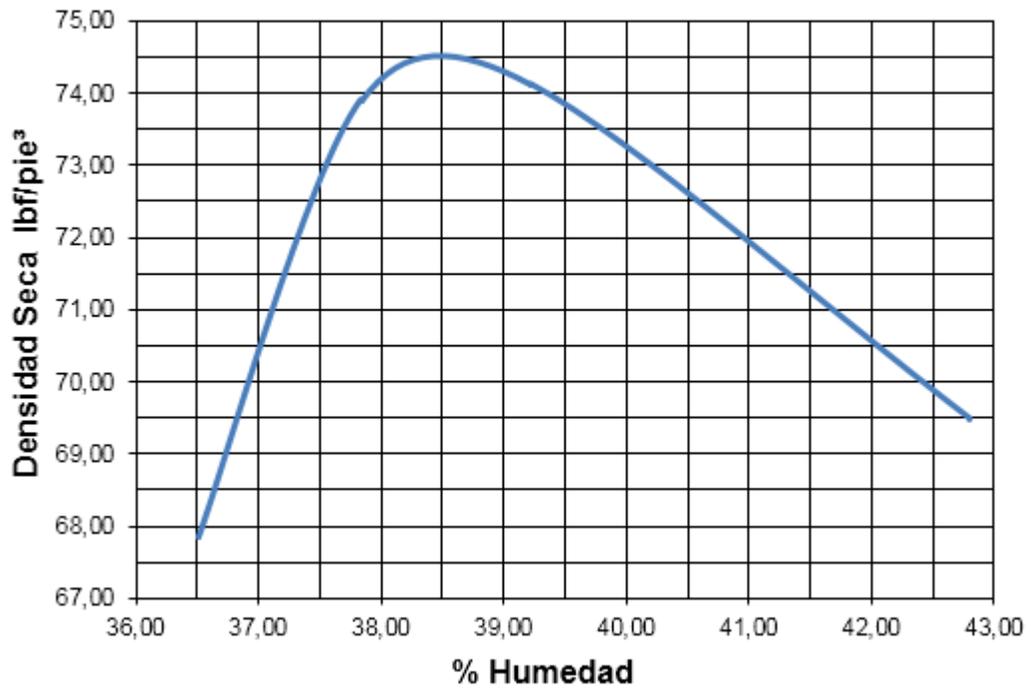
- Muestra 3

Tabla XVIII. **Proctor modificado de la muestra 3**

No. de Columna:	1		2		3		4	
Intervalo de Humedad en %:	20		23		25		28	
PBH	5,58		5,72		5,74		5,68	
Tara	4,18		4,18		4,18		4,18	
PNH	1,40		1,54		1,56		1,5	
PUH	92,61		101,87		103,19		99,23	
Tarro	M-2	C-12	C-17	C-19	A-33	C-6	A-25	A-38
PBH	76,66	86,92	97,10	68,81	89,55	78,59	86,01	80,82
PBS	62,73	70,31	77,44	55,71	71,22	63,26	67,69	63,94
Tara	24,65	24,75	25,01	21,40	24,40	24,25	24,74	24,62
Diferencia	13,93	16,61	19,66	13,10	18,33	15,33	18,32	16,88
PNS	38,08	45,56	52,43	34,31	46,82	39,01	42,95	39,32
% De Humedad	36,58	36,46	37,50	38,18	39,15	39,30	42,65	42,93
% De Humedad Promedio	36,52		37,84		39,22		42,79	
PUS	67,84		73,91		74,12		69,49	

Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Proctor modificado de la muestra 3



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

3.3.1.8. CBR

Al obtener el porcentaje de humedad y emulsión óptimas, se debe realizar el ensayo de valor de soporte.

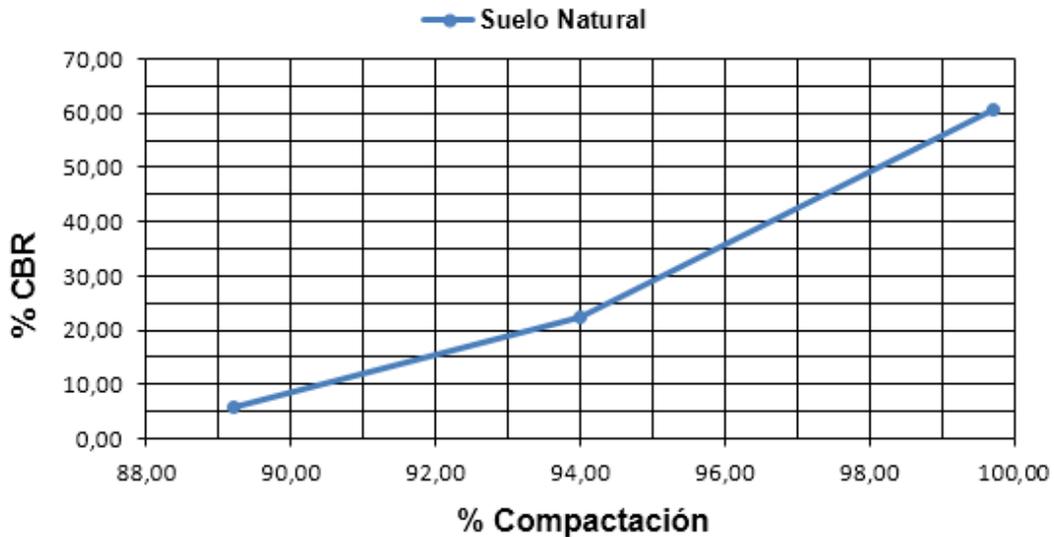
- Muestra 1

Tabla XIX. **CBR de la muestra 1**

Probeta	Golpes	A la compactación		C (%)	Expansión (%)	C.B.R. (%)
		H (%)	γd (Lbf/pie ³)			
1	10	20,95	69,29	89,20	0,31	5,83
2	30	20,95	72,99	94,00	0,17	22,23
3	65	20,95	77,43	99,70	0,20	60,50

Fuente: elaboración propia.

Figura 14. **CBR de la muestra 1**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

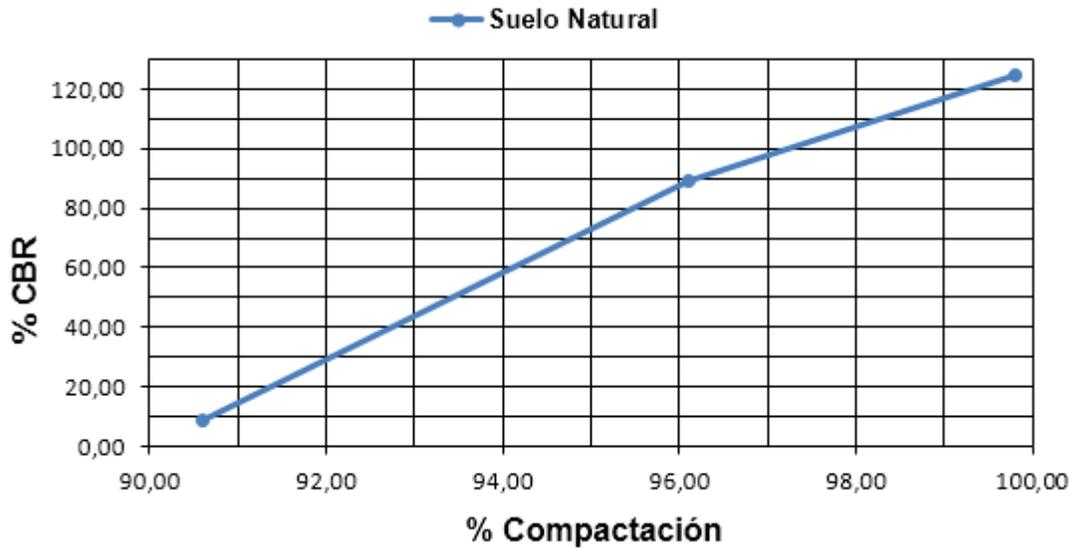
- Muestra 2

Tabla XX. **CBR de la muestra 2**

Probeta	Golpes	A la compactación		C	Expansión	C.B.R.
No.	No.	H (%)	γ_d (Lbf/pie ³)	(%)	(%)	(%)
1	10	21,80	67,02	90,60	0,07	8,53
2	30	21,80	71,15	96,10	0,09	89,08
3	65	21,80	73,82	99,80	0,15	124,48

Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **CBR de la muestra 2**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

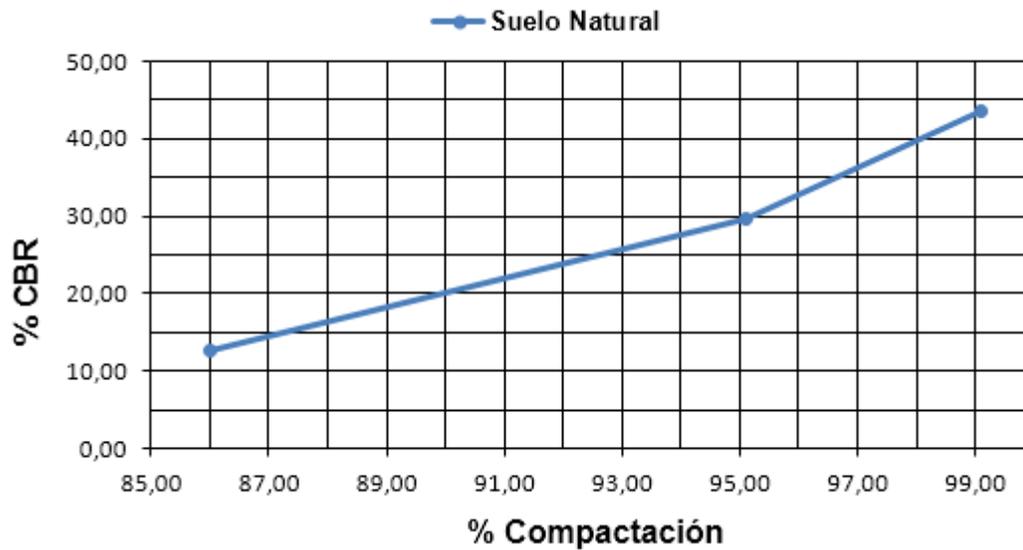
- Muestra 3

Tabla XXI. **CBR de la muestra 3**

Probeta	Golpes	A la compactación		C	Expansión	C.B.R.
		H (%)	γd (Lbf/pie ³)			
1	10	38,50	64,09	86,00	1,09	12,64
2	30	38,50	70,88	95,10	0,61	29,56
3	65	38,50	73,85	99,10	0,59	43,65

Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **CBR de la muestra 3**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

3.3.1.9. Resistencia a la compresión no confinada

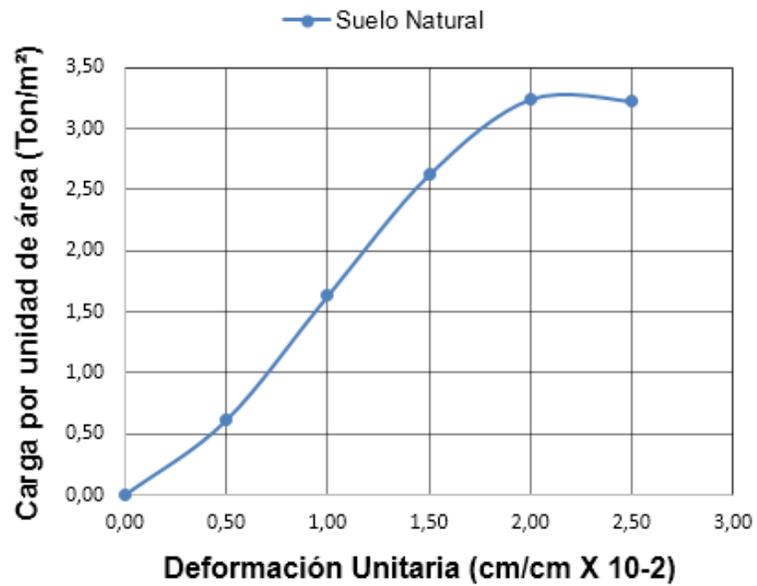
- Muestra 1

Tabla XXII. Resistencia a la compresión no confinada de la muestra 1

% ϵ	Esfuerzo Axial (Ton/m ²)
0,0	0,000
0,5	0,613
1,0	1,630
1,5	2,624
2,0	3,242
2,5	3,225

Fuente: elaboración propia.

Figura 17. Resistencia a la compresión no confinada de la muestra 1



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

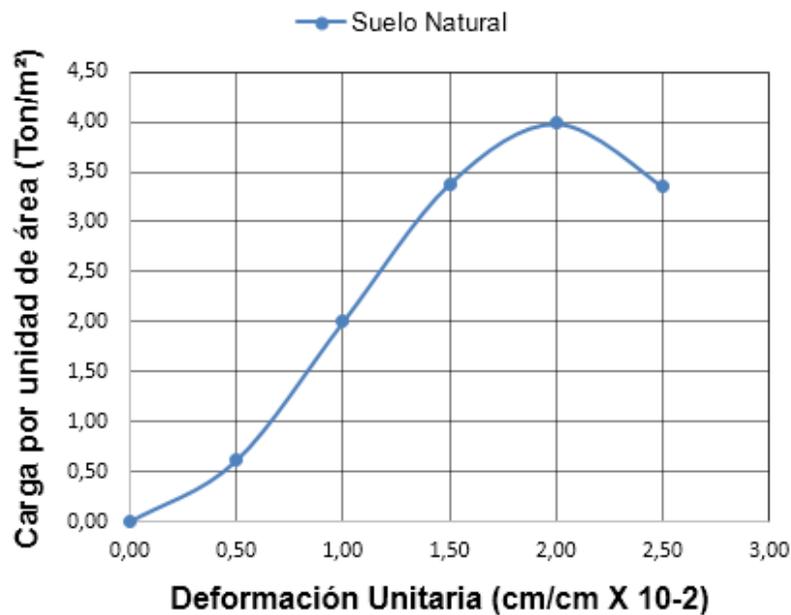
- Muestra 2

Tabla XXIII. Resistencia a la compresión no confinada de la muestra 2

% ϵ	Esfuerzo Axial (Ton/m ²)
0,0	0,000
0,5	0,613
1,0	1,999
1,5	3,385
2,0	3,986
2,5	3,351

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. Resistencia a la compresión no confinada de la muestra 2



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

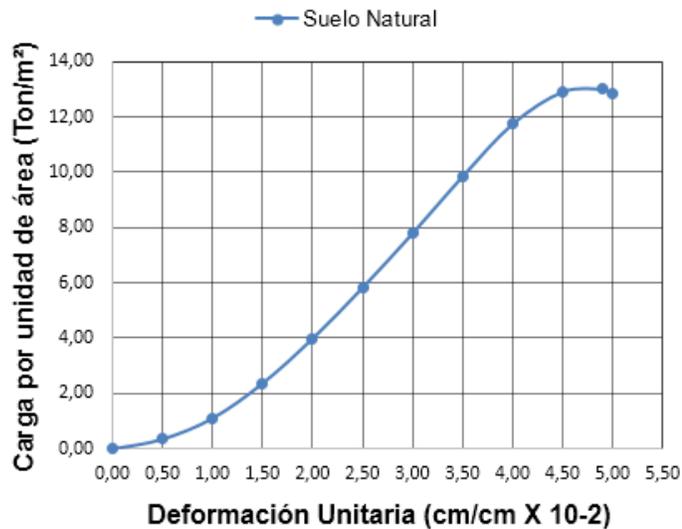
- Muestra 3

Tabla XXIV. Resistencia a la compresión no confinada de la muestra 3

% ϵ	Esfuerzo Axial (Ton/m ²)
0,0	0,000
0,5	0,356
1,0	1,106
1,5	2,370
2,0	3,986
2,5	5,836
3,0	7,807
3,5	9,867
4,0	11,768
4,5	12,924
4,9	13,006
5,0	12,856

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. Resistencia a la compresión no confinada de la muestra 3



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

3.3.2. Muestras de suelos en condiciones estabilizadas con emulsión asfáltica

Los datos obtenidos de estas muestras son producto de ensayos realizados con el porcentaje de emulsión asfáltica calculado por el Método de Duriez para cada suelo.

3.3.2.1. Límites de Atterberg

Cuando se realizaron los ensayos de estas muestras, no presentaron plasticidad para poder determinar los golpes normados del ensayo, por consiguiente se dice que los suelos no son plásticos.

3.3.2.2. Permeabilidad

- Muestra 1

Tabla XXV. Permeabilidad de la muestra 1 estabilizada

Ensayo No.	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	t (seg)	a (cm ²)	V _{in} (cm ³)	V _{out} (cm ³)	T (°C)	kT	η _T /η ₂₀	k _{20°C}
1	222,0	214,0	3 600	0,75	6,00	6,00	20	1,10E-06	1	1,097E-06
2	222,0	214,0	3 600	0,75	6,00	6,00	20	1,10E-06	1	1,097E-06
3	222,0	214,0	3 600	0,84	6,75	6,75	20	1,23E-06	1	1,234E-06
4	222,0	214,0	3 600	0,63	5,00	5,00	20	9,14E-07	1	9,140E-07
Promedio:	222,0	214,0	3 600	0,78	5,00	4,75	16	1,14E-06	1	1,142E-06

Fuente: elaboración propia.

- Muestra 2

Tabla XXVI. **Permeabilidad de la muestra 2 estabilizada**

Ensayo No.	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	t (seg)	a (cm ²)	V _{in} (cm ³)	V _{out} (cm ³)	T (°C)	kT	ηT/η20	k20°C
1	222,0	214,0	3 600	0,75	6,00	6,00	20	1,10E-06	1	1,097E-06
2	222,0	214,0	3 600	0,75	6,00	6,00	20	1,10E-06	1	1,097E-06
3	222,0	214,0	3 600	0,84	6,75	6,75	20	1,23E-06	1	1,234E-06
4	222,0	214,0	3 600	0,63	5,00	5,00	20	9,14E-07	1	9,140E-07
Promedio:	222,0	214,0	3 600	0,78	5,00	4,75	16	1,14E-06	1	1,142E-06

Fuente: elaboración propia.

- Muestra 3

Tabla XXVII. **Permeabilidad de la muestra 3 estabilizada**

Ensayo No.	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	t (seg)	a (cm ²)	V _{in} (cm ³)	V _{out} (cm ³)	T (°C)	kT	ηT/η20	k20°C
1	238,5	237,5	10 800	0,60	0,60	0,60	20	3,35E-08	1	3,349E-08
2	238,5	237,5	10 800	2,00	2,00	2,00	20	1,12E-07	1	1,116E-07
3	238,5	237,0	7 200	0,40	0,60	0,60	20	5,03E-08	1	5,028E-08
4	238,5	237,5	7 200	1,00	1,00	1,00	20	8,37E-08	1	8,371E-08
Promedio:	238,5	237,4	9 000	1,00	1,05	1,05	20	7,53E-08	1	7,534E-08

Fuente: elaboración propia.

3.3.2.3. Proctor modificado

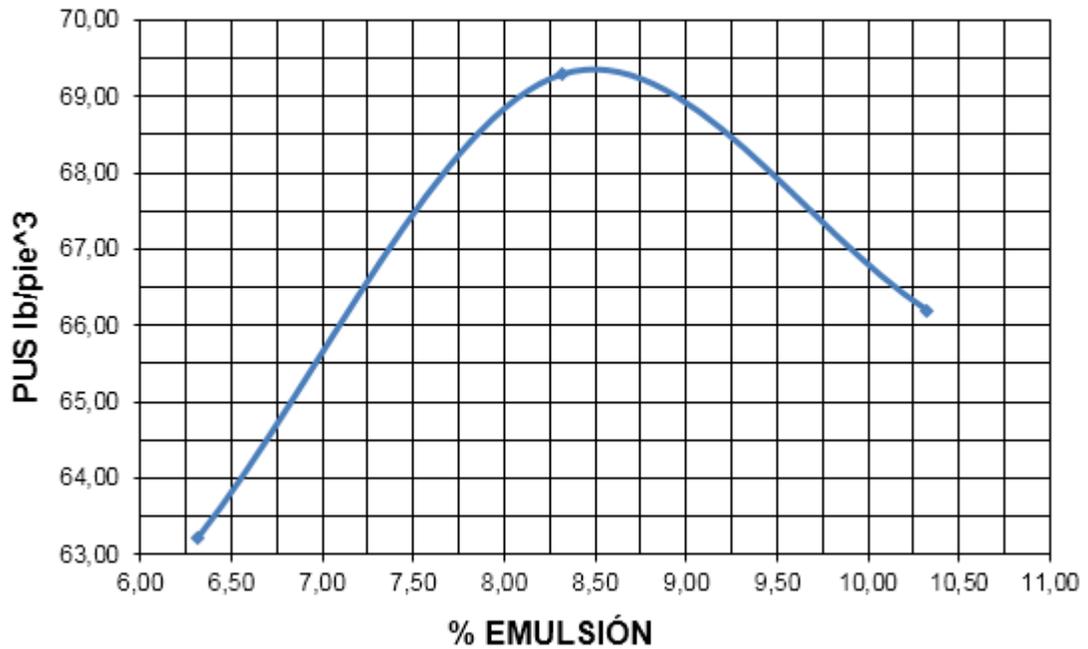
- Muestra 1

Tabla XXVIII. Proctor modificado de la muestra 1 estabilizada

No. de Columna:	1		2		3	
Porcentaje de Emulsión	5,58		7.58		9.58	
PBH	5,68		5.7		5.68	
Tara	4,18		4.18		4.18	
PNH	1,50		1.52		1.5	
PUH	99,23		100.55		99.23	
Tarro	A-14	A-53	M-2	C-12	C-17	C-19
PBH	68,49	70,45	51,89	54,50	67,77	66,22
PBS	58,87	60,37	46,44	48,39	59,92	58,41
Tara	24,16	24,43	24,58	24,75	24,36	24,91
Diferencia	9,62	10,08	5,45	6,11	7,85	7,81
PNS	34,71	35,94	21,86	23,64	35,56	33,50
% De Humedad	27,72	28,05	24,93	25,85	22,08	23,31
% De Humedad Promedio	33,46		32,97		32,27	
PUS	74,35		75,62		75,01	

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Proctor modificado de la muestra 1 estabilizada**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

- Muestra 2

Tabla XXIX. **Proctor modificado de la muestra 2 estabilizada**

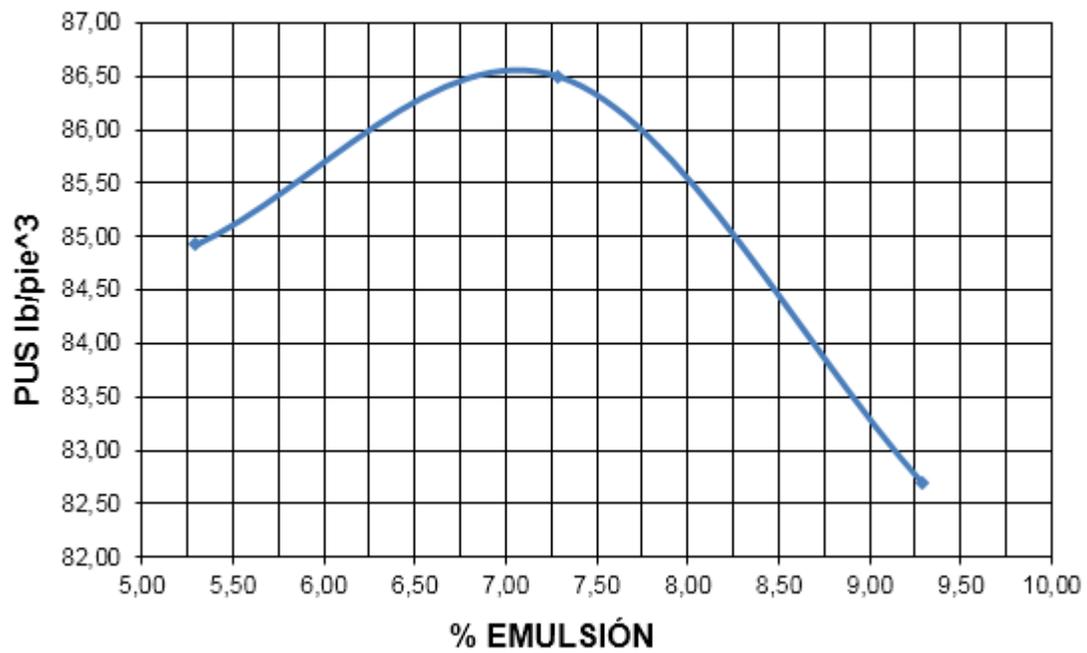
No. de Columna:	1		2		3	
Porcentaje de Emulsión	5,29		7,29		9,29	
PBH	5,74		5,78		5,7	
Tara	4,18		4,18		4,18	
PNH	1,56		1,60		1,52	
PUH	103,19		105,84		100,55	
Tarro	A-14	A-53	M-2	C-12	C-17	C-19
PBH	48,39	47,89	68,11	53,54	52,89	53,01
PBS	44,28	43,68	60,01	47,60	47,73	48,07
Tara	24,81	24,47	24,69	20,34	24,57	24,41

Continuación de tabla XXIX

Diferencia	4,11	4,21	8,10	5,94	5,16	4,94
PNS	19,47	19,21	35,32	27,26	23,16	23,66
% De Humedad	21,11	21,92	22,93	21,79	22,28	20,88
% De Humedad Promedio	21,51		22,36		21,58	
PUS	84,92		86,50		82,70	

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Proctor modificado de la muestra 2 estabilizada**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

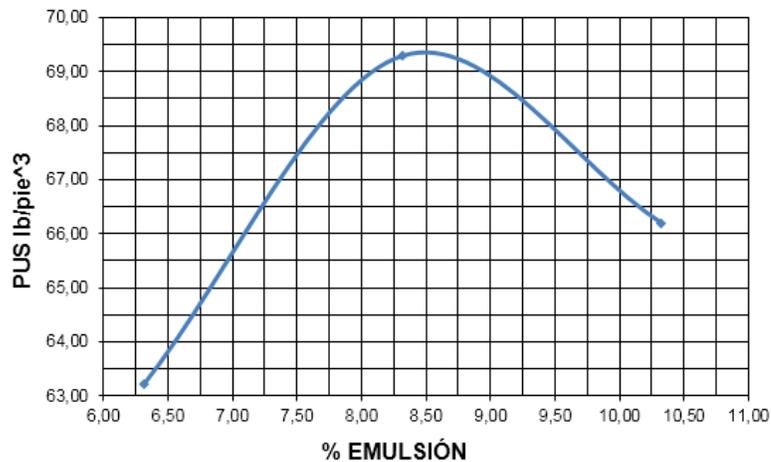
- Muestra 3

Tabla XXX. Proctor modificado de la muestra 3 estabilizada

No. de Columna:	1		2		3	
Porcentaje de Emulsión	6,32		8,32		10,32	
PBH	5,6		5,68		5,62	
Tara	4,18		4,18		4,18	
PNH	1,42		1,50		1,44	
PUH	93,93		99,23		95,26	
Tarro	A-14	A-53	M-2	C-12	C-17	C-19
PBH	61,91	60,78	70,43	71,17	56,35	64,62
PBS	49,75	47,56	56,71	57,07	46,64	52,64
Tara	24,73	20,33	24,97	24,44	24,77	25,03
Diferencia	12,16	13,22	13,72	14,10	9,71	11,98
PNS	25,02	27,23	31,74	32,63	21,87	27,61
% De Humedad	48,60	48,55	43,23	43,21	44,40	43,39
% De Humedad Promedio	48,58		43,22		43,89	
PUS	63,22		69,28		66,20	

Fuente: elaboración propia.

Figura 22. Proctor modificado de la muestra 3 estabilizada



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

3.3.2.4. CBR

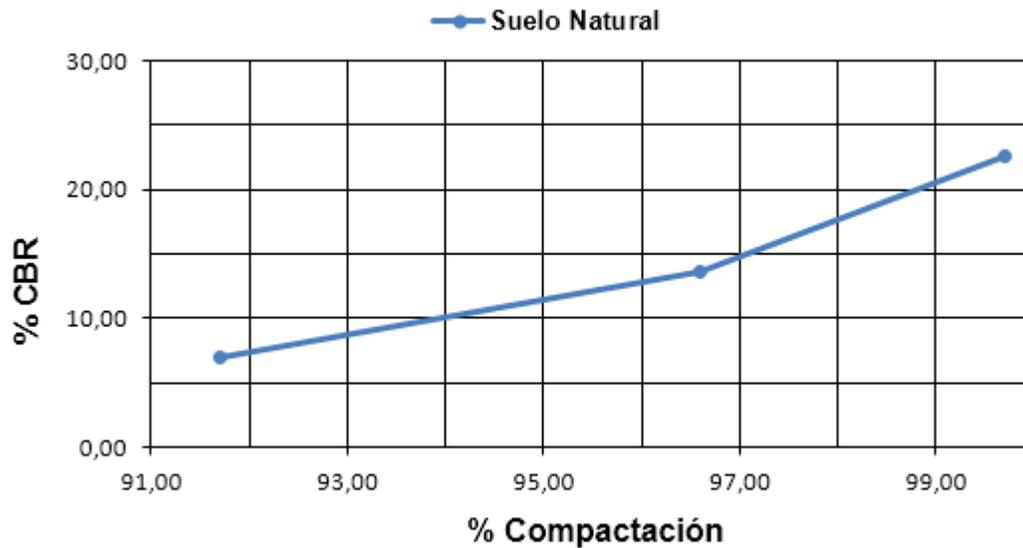
- Muestra 1

Tabla XXXI. **CBR de la muestra 1 estabilizada**

Probeta	Golpes	A la compactación		C	Expansión	C.B.R.
		H (%)	γ_d (Lbf/pie ³)			
1	10	19,31	69,37	91,70	0,74	6,89
2	30	19,31	73,07	96,60	0,63	13,54
3	65	19,31	75,39	99,70	0,98	22,55

Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **CBR de la muestra 1 estabilizada**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

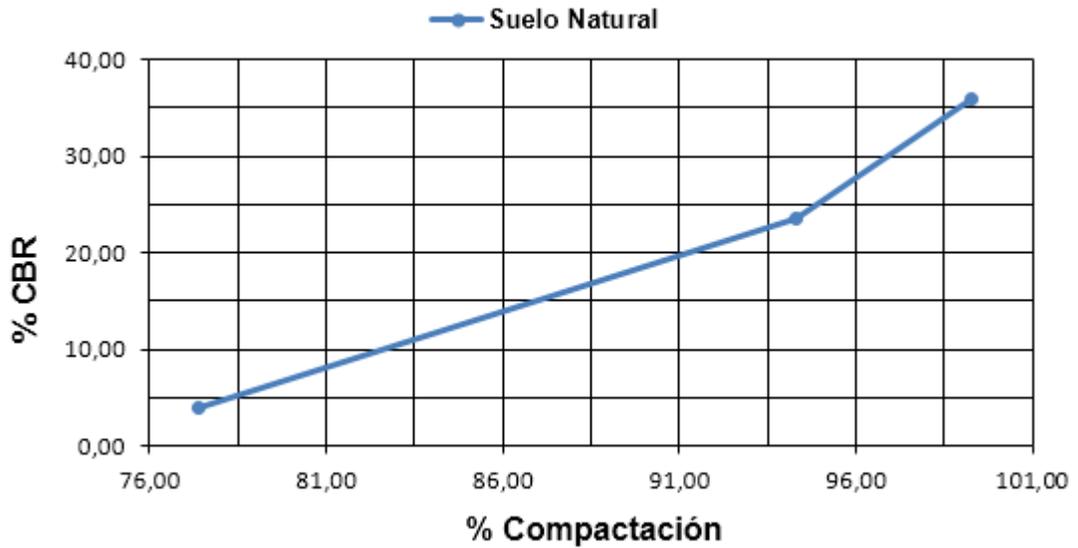
- Muestra 2

Tabla XXXII. **CBR de la muestra 2 estabilizada**

Probeta	Golpes	A la compactación		C	Expansión	C.B.R.
No.	No.	H (%)	γ_d (Lbf/pie ³)	(%)	(%)	(%)
1	10	21,21	63,42	77,40	0,07	4,03
2	30	21,21	63,42	94,30	0,52	23,49
3	65	21,21	77,21	99,30	0,57	35,83

Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **CBR de la muestra 2 estabilizada**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

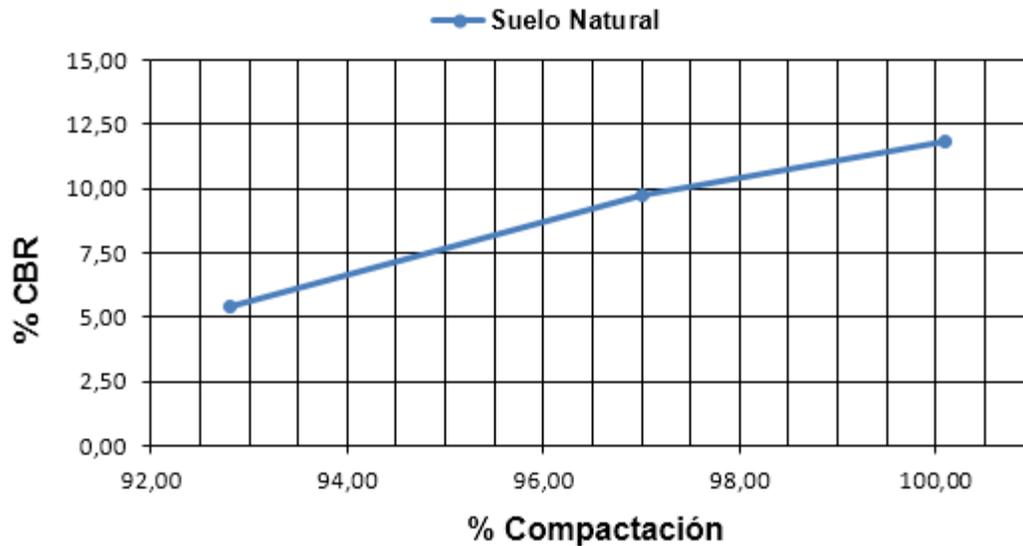
- Muestra 3

Tabla XXXIII. **CBR de la muestra 3 estabilizada**

Probeta	Golpes	A la compactación		C	Expansión	C.B.R.
No.	No.	H (%)	γ_d (Lbf/pie ³)	(%)	(%)	(%)
1	10	40,51	60,80	92,80	0,07	5,44
2	30	40,51	63,56	97,00	0,52	9,78
3	65	40,51	65,53	100,10	0,57	11,83

Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **CBR de la muestra 3 estabilizada**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

3.3.2.5. Resistencia a la compresión no confinada

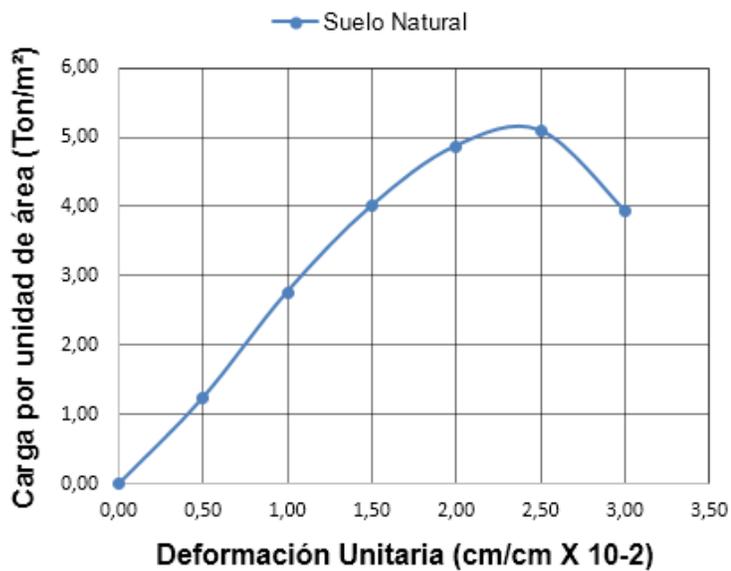
- Muestra 1

Tabla XXXIV. Resistencia a la compresión no confinada, muestra 1 estabilizada

% ϵ	Esfuerzo Axial (Ton/m ²)
0,0	0,000
0,5	1,240
1,0	2,765
1,5	4,006
2,0	4,870
2,5	5,096
3,0	3,945

Fuente: elaboración propia.

Figura 26. Resistencia a la compresión no confinada de la muestra 1 estabilizada



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

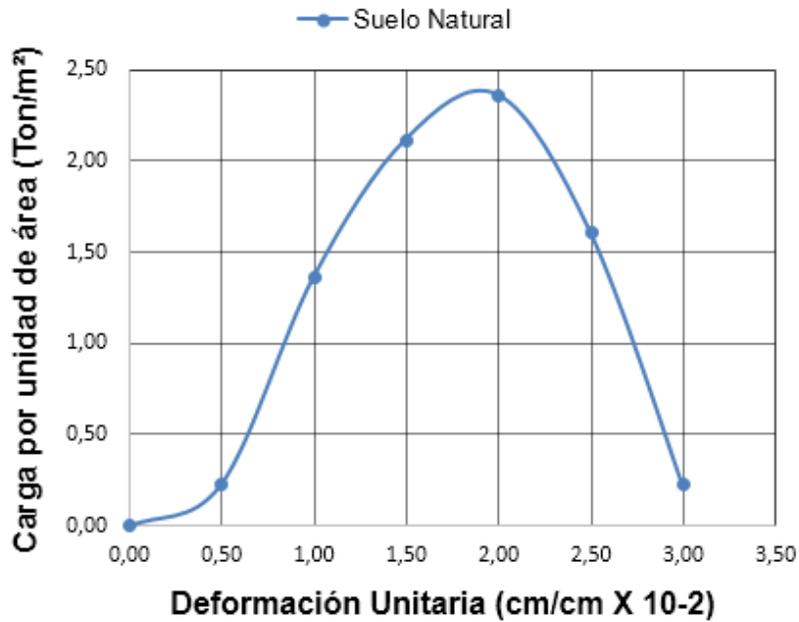
- Muestra 2

Tabla XXXV. **Resistencia a la compresión no confinada, muestra 2 estabilizada**

% ϵ	Esfuerzo Axial (Ton/m ²)
0,0	0,000
0,5	0,228
1,0	1,361
1,5	2,116
2,0	2,358
2,5	1,606
3,0	0,222

Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Resistencia a la compresión no confinada de la muestra 2 estabilizada**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

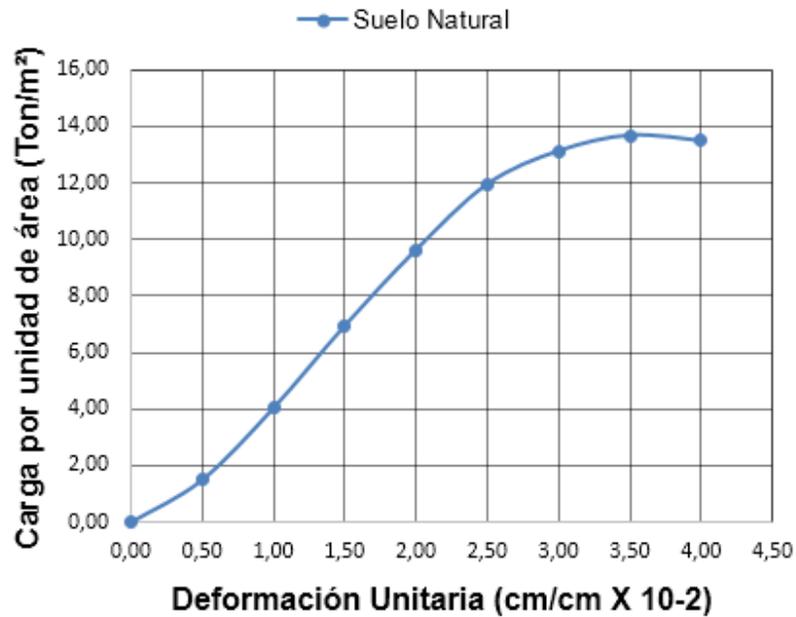
- Muestra 3

Tabla XXXVI. **Resistencia a la compresión no confinada, muestra 3 estabilizada**

% ϵ	Esfuerzo Axial (Ton/m ²)
0,0	0,000
0,5	1,496
1,0	4,026
1,5	6,940
2,0	9,627
2,5	11,952
3,0	13,127
3,5	13,681
4,0	13,486

Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Resistencia a la compresión no confinada de la muestra 3 estabilizada**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

3.3.2.6. Estabilidad y flujo Marshall

- Muestra 1

Tabla XXXVII. **Estabilidad y flujo Marshall de la muestra 1 estabilizada**

Probeta	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Peso (g)	Carga (lbf)	Deformación (0,01 plg)
1	102,09	72,00	910,31	100	10
2	101,87	70,09	921,81	107	11
3	101,74	70,09	947,12	191	10

Fuente: elaboración propia.

- Muestra 2

Tabla XXXVIII. **Estabilidad y flujo Marshall de la muestra 2 estabilizada**

Probeta	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Peso (g)	Carga (lbf)	Deformación (0,01 plg)
1	101,41	69,25	928,44	119	13
2	101,49	67,52	904,19	99	13
3	101,35	68,48	933,13	130	10

Fuente: elaboración propia.

- Muestra 3

Tabla XXXIX. **Estabilidad y flujo Marshall de la muestra 3 estabilizada**

Probeta	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Peso (g)	Carga (lbf)	Deformación (0,01 plg)
1	101,30	47,73	594,95	65	10
2	101,92	68,42	881,56	115	11
3	102,60	69,15	893,87	123	12

Fuente: elaboración propia.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO

Todos y cada uno de los siguientes resultados se calcularon con base en los datos obtenidos por el laboratorio de mecánica de suelos y el laboratorio de asfaltos. Están determinados dentro de condiciones naturales y también en condiciones estabilizadas con la emulsión asfáltica.

4.1. Estabilización con emulsión asfáltica en los diferentes suelos

Cuando el suelo se encuentra en condiciones naturales sus propiedades mecánicas y sus características físicas cambian en relación a la proporción de emulsión asfáltica, al aplicarles la emulsión todo cambia, es decir, la plasticidad puede ser reducida y la resistencia a la compresión puede aumentar o disminuir, según sean las características del suelo.

4.2. Muestras de suelos

4.2.1. Granulometría

- Muestra 1

Tabla XL. **Granulometría de la muestra 1**

Descripción del suelo	Arena limosa color café oscuro		
Clasificación	% Grava	2,53	D ₁₀ = *

Continuación de la tabla XL

	SCU	SM	% Arena	58,66	D ₃₀ = *
	PRA	A-4	% Finos	38,81	D ₆₀ = 0,24 mm

Fuente: elaboración propia.

- Muestra 2

Tabla XLI. **Granulometría de la muestra 2**

Descripción del suelo	Arena limosa color café				
Clasificación			% Grava	3,08	D ₁₀ = *
	SCU	SM	% Arena	69,87	D ₃₀ = 0,10 mm
	PRA	A-2-4	% Finos	27,04	D ₆₀ = 0,46 mm

Fuente: elaboración propia.

- Muestra 3

Tabla XLII. **Granulometría de la muestra 3**

Descripción del suelo	Limo arenoso color café claro con presencia de grava				
Clasificación			% Grava	20,41	D ₁₀ = *
	SCU	SM	% Arena	39,02	D ₃₀ = *
	PRA	A-5	% Finos	40,57	D ₆₀ = 0,095 mm

Fuente: elaboración propia.

Estos son los diferentes tipos de suelos que se ensayaron, con sus respectivas clasificaciones según el sistema de la AASHTO.

4.2.2. **Peso unitario**

Tabla XLIII. **Peso unitario**

MUESTRA	CONDICIÓN	PESO UNITARIO kg/m³
1	Apisonado	1 000,11
	Suelto	946,43
2	Apisonado	887,11
	Suelto	850,38
3	Apisonado	991,64
	Suelto	954,91

Fuente: elaboración propia.

Al ser suelos de grano fino, su densidad es muy baja con respecto a los parámetros definidos por la Dirección General de Caminos, en los que se define que el material no debe ser menor de 1 280 kg/m³, por lo tanto, las muestras no son buenos suelos y, por ende, no son óptimos según las especificaciones antes mencionadas, siendo la muestra 2 la que menos peso volumétrico tiene.

4.2.3. **Gravedad específica**

Tabla XLIV. **Gravedad específica**

MUESTRA	COLOR	GRAVEDAD ESPECÍFICA
1	Café	2,25
2	Café	2,08
3	Café	1,76

Fuente: elaboración propia.

4.2.4. Equivalente de arena

Tabla XLV. Equivalente de arena

MUESTRA	PROBETA	LECTURA DE ARENA	EA
1	1	19,6	19,5
	2	19,3	
2	1	60,7	57,2
	2	53,7	
3	1	52,2	51,1
	2	50,0	

Fuente: elaboración propia.

El material de la muestra 1 posee un equivalente de arena menor que el parámetro requerido por la Dirección General de Caminos, que debe ser no menor a 30.

4.2.5. Límites de Atterberg

- Suelos en condiciones naturales.
 - Muestra 1

Tabla XLVI. Límites de Atterberg de la muestra 1

Ensayo	Muestra	LL (%)	IP (%)	Clasificación	Descripción del suelo
1	1	NP	NP	ML	Arena limosa color café oscuro

Fuente: elaboración propia.

- Muestra 2

Tabla XLVII. Límites de Atterberg de la muestra 2

Ensayo	Muestra	LL (%)	IP (%)	Clasificación	Descripción del suelo
1	1	NP	NP	ML	Arena limosa color café

Fuente: elaboración propia.

- Muestra 3

Tabla XLVIII. Límites de Atterberg de la muestra 3

Ensayo	Muestra	LL (%)	IP (%)	Clasificación	Descripción del suelo
1	1	55.2	4.6	MH	Limo arenoso de alta plasticidad color café oscuro con presencia de grava

Fuente: elaboración propia.

- Suelos en condiciones estabilizadas con emulsión asfáltica.

- Muestra 1

Tabla XLIX. Límites de Atterberg de la muestra 1 estabilizada con emulsión asfáltica

Ensayo	Muestra	LL (%)	IP (%)	Clasificación	Descripción del suelo
1	1	NP	NP	ML	Arena limosa color café oscuro

Fuente: elaboración propia.

- Muestra 2

Tabla L. **Límites de Atterberg de la muestra 2 estabilizada con emulsión asfáltica**

Ensayo	Muestra	LL (%)	IP (%)	Clasificación	Descripción del suelo
1	1	NP	NP	ML	Arena limosa color café

Fuente: elaboración propia.

- Muestra 3

Tabla LI. **Límites de Atterberg de la muestra 3 estabilizada con emulsión asfáltica**

Ensayo	Muestra	LL (%)	IP (%)	Clasificación	Descripción del suelo
1	1	NP	NP	ML	Limo arenoso de alta plasticidad color café oscuro con presencia de grava

Fuente: elaboración propia.

La muestra 3, según los resultados, disminuyó su plasticidad, esto puede ayudar a que el suelo al ser sometido a fuerzas de compresión pueda resistir más, aunque, si no presenta mucha plasticidad, también le afecte debido a que la plasticidad proporciona cierta adherencia entre las partículas de arena, que hace que ellas se mantengan unidas y tengan una resistencia adecuada, eso mejora las propiedades mecánicas de un suelo para subbases o bases, debido a que con presencia de humedad se evita que el mismo se vuelva intransitable.

Dichos suelos también presentan una buena aceptación con su plasticidad, debido a que, según los requisitos, el índice plástico de los suelos recomendados no debe ser mayor de 6.

4.2.6. Permeabilidad

Tabla LII. Permeabilidad de los suelos naturales y estabilizados

Muestra	Índice de Permeabilidad del Suelo Natural	Índice de Permeabilidad del Suelo Estabilizado
1	$5,387 \times 10^{-7}$	$1,143 \times 10^{-6}$
2	$1,109 \times 10^{-5}$	$2,58 \times 10^{-6}$
3	$3,795 \times 10^{-6}$	$6,977 \times 10^{-8}$

Fuente: elaboración propia.

Los índices de permeabilidad se mantuvieron, debido a que los suelos no fueron afectados en sus características físicas y, por ello, la variación se considera insignificante.

4.2.7. Proctor modificado

Tabla LIII. Proctor modificado de los suelos naturales y estabilizados

Muestra	Condición	Peso Unitario Seco Máximo kg/m^3	% Humedad Óptima	% Emulsión
1	Natural	1 244,11	20,95	0,00
	Estabilizada	1 211,91	20,95	7,80
2	Natural	1 185,48	21,80	0,00
	Estabilizada	1 312,04	21,80	6,70
3	Natural	1 193,49	38,50	0,00
	Estabilizada	1 049,31	38,50	8,40

Fuente: elaboración propia.

Dos de las muestras de suelos en condiciones estabilizadas con emulsión asfáltica presentaron menor porcentaje de compactación que en condiciones naturales, aunque hay una muestra que presentó aumento en la densidad de compactación, esto se debe al índice de plasticidad presente en los suelos, ya que la emulsión asfáltica tiene como principal objetivo disminuir la plasticidad, pero el beneficio que se adquiere es la resistencia a la compresión.

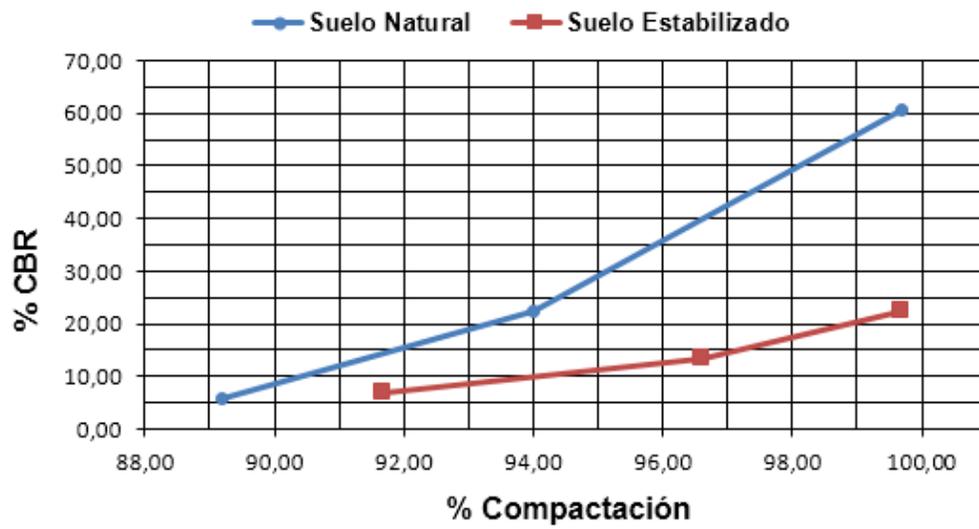
Debido a los resultados se aprecia que las densidades de Proctor se mantienen, lo que cambia es el porcentaje de emulsión, con lo que, por consiguiente, cambia su densidad. Por el tipo de ensayo el tiempo de curado es poco, esto evita que el agua se desprenda de la emulsión.

La relación humedad-masa unitaria solo varía según el porcentaje de emulsión asfáltica que se le aplique al suelo, debido a que se corrige con el 40 % de agua que ya posee la composición química de la emulsión asfáltica, ya que el porcentaje de humedad óptima del suelo no debe variar.

4.2.8. CBR

- Muestra 1

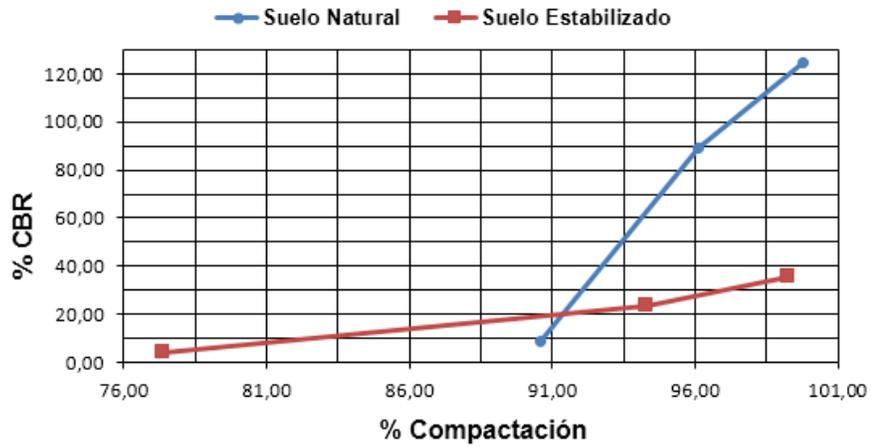
Figura 29. CBR de suelo natural vs suelo estabilizado de la muestra 1



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

- Muestra 2

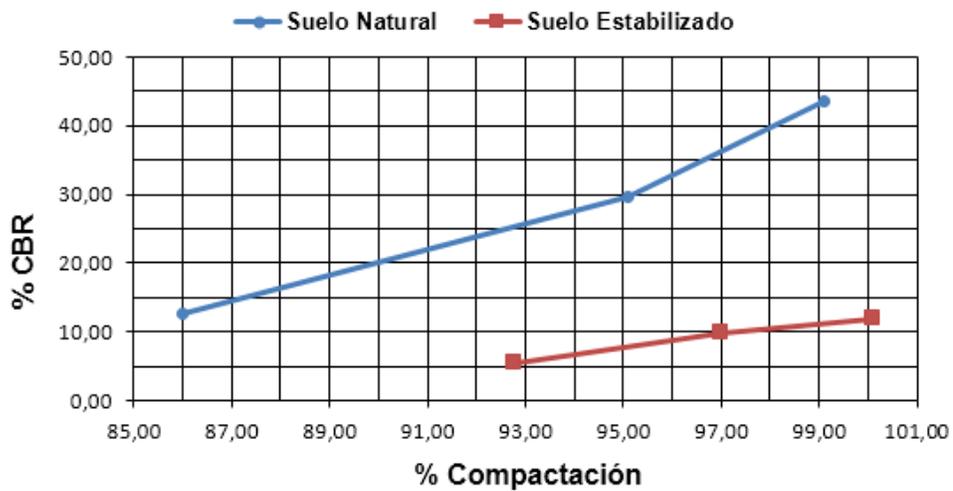
Figura 30. **CBR de suelo natural vs suelo estabilizado de la muestra 2**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

- Muestra 3

Figura 31. **CBR de suelo natural vs suelo estabilizado de la muestra 3**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Las tres muestras de suelos en condiciones estabilizadas con emulsión asfáltica presentaron un porcentaje de CBR menor que en condiciones naturales, esto se debe a que, por el tipo de ensayo, el curado es excluido, ya que las muestras permanecen sumergidas en agua, esto evita que el agua de la emulsión asfáltica se evapore de las mismas. La disminución del porcentaje de CBR no fue proporcional debido a las diferencias de características físicas de los distintos suelos, así mismo, los tres suelos en condiciones naturales están dentro de un CBR de 30 % al 95 % de compactación, según los requisitos. El CBR disminuyó debido al tiempo de curado, pero el aumento de resistencia se ve reflejado en el ensayo de compresión no confinada.

4.2.9. Resistencia a la compresión no confinada de probetas

- Muestras de suelos en condiciones naturales.
 - Muestra 1

Tabla LIV. Resistencia a la compresión no confinada, muestra 1

Información del ensayo	Valor obtenido
Diámetro inicial	6,35 cm
Altura inicial	12,70 cm
Área inicial	31,67 cm ²
Volumen inicial	402,20 cm ³
Humedad inicial antes de extraer el espécimen (%H)	23,87
Humedad del espécimen (%H)	24,42
Densidad húmeda inicial	1,47 Ton/m ³
Velocidad de deformación	0,05 plg/min
Esfuerzo de compresión	3,24 Ton/m ²
Cohesión	1,62 Ton/m ²
Deformación unitaria de falla en porcentaje (ϵ)	2,00

Fuente: elaboración propia.

- Muestra 2

Tabla LV. **Resistencia a la compresión no confinada, muestra 2**

Información del ensayo	Valor obtenido
Diámetro inicial	6,35 cm
Altura inicial	12,70 cm
Área inicial	31,67 cm ²
Volumen inicial	402,20 cm ³
Humedad inicial antes de extraer el espécimen (%H)	23,10
Humedad del espécimen (%H)	23,70
Densidad húmeda inicial	1,45 Ton/m ³
Velocidad de deformación	0,05 plg/min
Esfuerzo de compresión	3,98 Ton/m ²
Cohesión	1,99 Ton/m ²
Deformación unitaria de falla en porcentaje (ϵ)	2,00

Fuente: elaboración propia.

- Muestra 3

Tabla LVI. **Resistencia a la compresión no confinada, muestra 3**

Información del ensayo	Valor obtenido
Diámetro inicial	6,35 cm
Altura inicial	12,70 cm
Área inicial	31,67 cm ²
Volumen inicial	402,20 cm ³
Humedad inicial antes de extraer el espécimen (%H)	40,65
Humedad del espécimen (%H)	43,19
Densidad húmeda inicial	1,63 Ton/m ³
Velocidad de deformación	0,05 plg/min
Esfuerzo de compresión	13,00 Ton/m ²
Cohesión	6,50 Ton/m ²
Deformación unitaria de falla en porcentaje (ϵ)	4,90

Fuente: elaboración propia.

- Muestras de suelos en condiciones estabilizadas con emulsión asfáltica.
 - Muestra 1

Tabla LVII. **Resistencia a la compresión no confinada, muestra 1 estabilizada**

Información del ensayo	Valor obtenido
Diámetro inicial	6,35 cm
Altura inicial	12,70 cm
Área inicial	31,67 cm ²
Volumen inicial	402,20 cm ³
Humedad inicial antes de extraer el espécimen (%H)	19,31
Humedad del espécimen (%H)	19,50
Densidad húmeda inicial	1,46 Ton/m ³
Velocidad de deformación	0,05 plg/min
Esfuerzo de compresión	5,96 Ton/m ²
Cohesión	2,98 Ton/m ²
Deformación unitaria de falla en porcentaje (ϵ)	2,50

Fuente: elaboración propia.

- Muestra 2

Tabla LVIII. **Resistencia a la compresión no confinada, muestra 2 estabilizada**

Información del ensayo	Valor obtenido
Diámetro inicial	6,35 cm
Altura inicial	12,70 cm
Área inicial	31,67 cm ²
Volumen inicial	402,20 cm ³
Humedad inicial antes de extraer el espécimen (%H)	19,31
Humedad del espécimen (%H)	19,50
Densidad húmeda inicial	1,46 Ton/m ³
Velocidad de deformación	0,05 plg/min
Esfuerzo de compresión	2,36 Ton/m ²

Cohesión	1,18 Ton/m ²
Deformación unitaria de falla en porcentaje (ϵ)	2,00

Fuente: elaboración propia.

- Muestra 3

Tabla LIX. **Resistencia a la compresión no confinada, muestra 3 estabilizada**

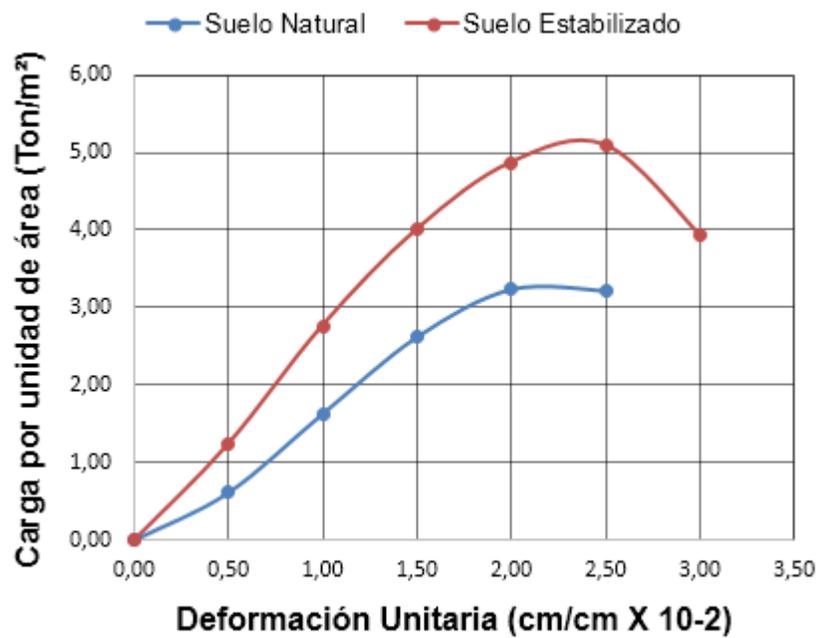
Información del ensayo	Valor obtenido
Diámetro inicial	6,35 cm
Altura inicial	12,70 cm
Área inicial	31,67 cm ²
Volumen inicial	402,20 cm ³
Humedad inicial antes de extraer el espécimen (%H)	38,91
Humedad del espécimen (%H)	40,27
Densidad húmeda inicial	1,61 Ton/m ³
Velocidad de deformación	0,05 plg/min
Esfuerzo de compresión	13,68 Ton/m ²
Cohesión	6,84 Ton/m ²
Deformación unitaria de falla en porcentaje (ϵ)	3,50

Fuente: elaboración propia.

Dentro del esfuerzo de compresión de las muestras de los suelos en condiciones naturales y las muestras de suelos en condiciones estabilizadas con emulsión asfáltica, se puede observar que el esfuerzo de compresión incrementó con las muestras estabilizadas.

- Comparación de resultados
 - Muestra 1

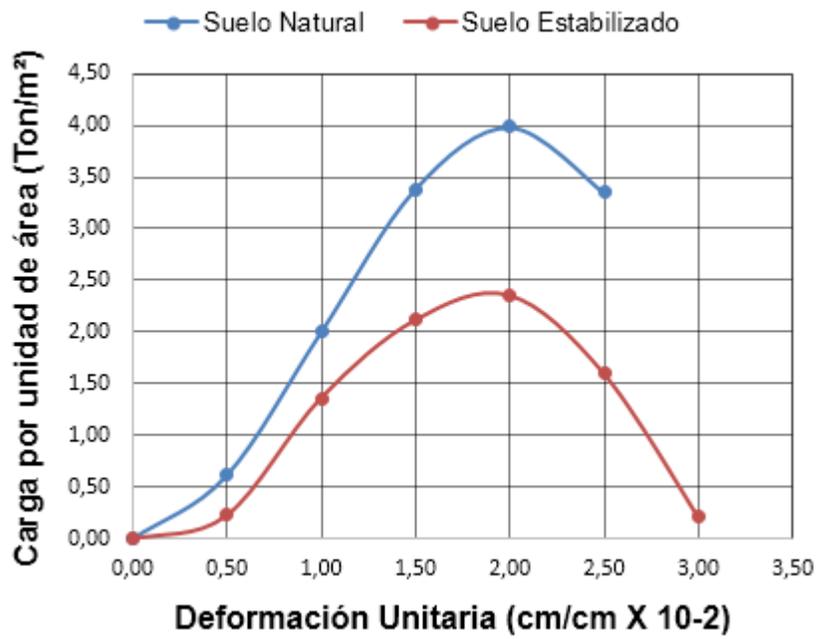
Figura 32. **Resistencia a la compresión no confinada, suelo natural vs suelo estabilizado de la muestra 1**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

- Muestra 2

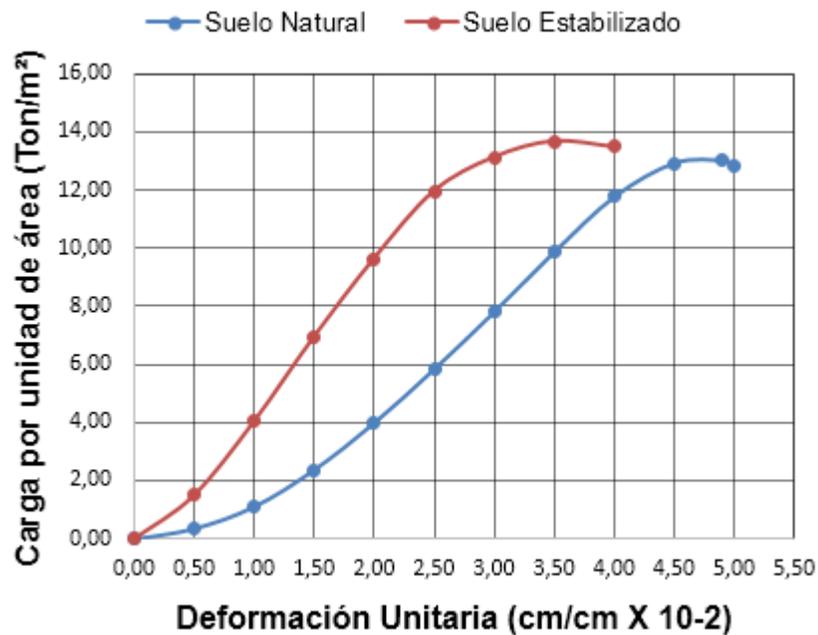
Figura 33. **Resistencia a la compresión no confinada, suelo natural vs suelo estabilizado de la muestra 2**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

- Muestra 3

Figura 34. **Resistencia a la compresión no confinada, suelo natural vs suelo estabilizado de la muestra 3**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Los resultados de las tres muestras de suelos estabilizadas presentaron mayor resistencia a la compresión no confinada que en condiciones naturales, esto da la certeza y confiabilidad de que al utilizar suelos en condiciones estabilizadas con emulsión asfáltica, para soportar cargas que los pueden someter a compresión, resistirán más que el mismo suelo en condiciones naturales. El aumento de resistencia se debe a que el tiempo de curado de las probetas fue mayor y el agua inmersa en la emulsión asfáltica fue evaporada.

4.2.10. Estabilidad y flujo Marshall

Tabla LX. **Lectura del dial y deformación Marshall**

Muestra	Lectura Dial (lbf)	Deformación (0.01 plg)	Relación Estabilidad-Fluencia
1	132,67	10,33	12,84
2	116,00	12,00	9,67
3	101,00	11,00	9,19

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXI. **Estabilidad y flujo Marshall de la muestra 1**

Probeta	Estabilidad (lbf)	Fluencia (0.01 plg)
1	776,60	10,00
2	881,50	11,00
3	1 569,50	10,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXII. **Estabilidad y flujo Marshall de la muestra 2**

Probeta	Estabilidad (lbf)	Fluencia (0.01 plg)
1	1 001,25	13,00
2	874,20	13,00
3	1 112,00	10,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXIII. **Estabilidad y flujo Marshall de la muestra 3**

Probeta	Estabilidad (lbf)	Fluencia (0.01 plg)
1	1 109,80	10,00
2	979,00	11,00
3	1 001,50	12,00

Fuente: elaboración propia.

Este ensayo no se realizó con las muestras en condiciones naturales por el fenómeno de la cohesión existente en los suelos.

CONCLUSIONES

1. Estabilizar los suelos finos con poca plasticidad se realizó por medio del Método de Duriez, para lo cual, partiendo de la granulometría que posea el material, se debe calcular el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica a aplicar, con los datos obtenidos en la resistencia a compresión indirecta Marshall. Los valores obtenidos para suelos estabilizados con emulsión asfáltica superaron los valores permisibles previamente mencionados en las especificaciones, aunque los valores de CBR no alcanzaron la resistencia.
2. Las propiedades mecánicas de los suelos mejoraron al disminuir la plasticidad de los mismos y al aplicarles el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica, ya que su resistencia a la compresión no confinada aumentó, así como la compresibilidad Marshall, debido a que son suelos finos y el CBR no aumenta significativamente por la poca fricción entre sus partículas.
3. La plasticidad de los suelos se ve afectada directamente en la muestra 3 al eliminar totalmente su índice de plasticidad, por lo cual el suelo aumentó su resistencia y se reduce el cambio volumétrico en la muestra.
4. Al experimentar cada suelo con 3 porcentajes diferentes de emulsión asfáltica con el ensayo de Proctor modificado, se apreció en las curvas de densidad seca que el porcentaje de emulsión asfáltica óptima teórica es similar a la calculada con el porcentaje experimental, ya que su variación no es significativa.

5. En los resultados del ensayo de resistencia a la compresión no confinada se notaron mejoras en la resistencia a compresibilidad de las muestras, lo cual hizo ver que la estabilización con emulsión asfáltica es funcional.

RECOMENDACIONES

1. Es recomendable utilizar suelos finos de poca plasticidad, debido a que reflejan mejor comportamiento en la estabilización con emulsión asfáltica, ya que, si se utilizan suelos muy plásticos, se reduce su plasticidad, pero no lo suficiente para mejorar su resistencia y soportar cargas.
2. Por resultados obtenidos en este trabajo de graduación se recomienda calcular el porcentaje de emulsión por el Método de Duriez, ya que los resultados experimentales en comparación con los teóricos se mantuvieron. Pueden existir otros métodos, pero lo mejor es hacerles sus estudios correspondientes, debido a que en estos ensayos solo se utilizó dicho método.
3. Debido a que todos los suelos tienen características físicas y propiedades mecánicas diferentes, es necesario realizar todos los ensayos correspondientes para conocer sus reacciones ante la estabilización con la emulsión asfáltica.
4. Para estabilizar los suelos estos deben tener un peso unitario mínimo de $1\ 280\ \text{kg/m}^3$, según recomienda la sección 307-3 de las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos, debido a que las partículas, al ser muy finas, no poseen mayor resistencia a la fricción entre ellas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Asphalt Emulsion Manufacturers Association (AEMA). *Manual básico de emulsiones asfálticas*. Series No. 19. USA. 1994. 113 p.
2. GONZÁLEZ ESCOBAR, Wilfredo. *Guía básica para el uso de emulsiones asfálticas en la estabilización de bases en caminos de baja intensidad en El Salvador*. Trabajo de graduación de Ingeniería Civil, Universidad de El Salvador, Facultad de Ingeniería, 2007. 284 p.
3. HERNÁNDEZ CANALES, Juan Carlos. *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*. Trabajo de graduación de Ingeniería Civil, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. 466 p.
4. Dirección General de Caminos, Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. *Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes*. Edición 2001. República de Guatemala, Centro América. 307 p.
5. RECINOS JUÁREZ, Marvin Rubén. *Estabilización de caminos de balasto con emulsión asfáltica, como una alternativa para el mantenimiento de carreteras*. Trabajo de graduación de Ingeniería Civil, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. 117 p.

ANEXOS

Anexo 1. Informe de resultados de laboratorio de Límites de Atterberg



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



INFORME No. 459 S.S.

O.T.: 37,682

No. 11934

Interesado: Estuardo Alberto Divas Hidalgo

Proyecto: Trabajo de Graduación "Estabilización de Suelos con Emulsión Asfáltica Para el Empleo en Subbases y Bases"

Asunto: ENSAYO DE LIMITES DE ATTERBERG

Norma: AASHTO T-89 Y T-90

Ubicación: Sección Mecánica de Suelos

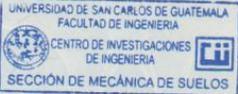
FECHA: lunes, 9 de octubre de 2017

RESULTADOS:

ENSAYO No.	MUESTRA No.	LL (%)	LP (%)	CLASIFICACION *	DESCRIPCION DEL SUELO
1	1	N.P.	N.P.	ML	Arena Limosa Color Café con Emulsión
2	2	N.P.	N.P.	ML	Arena Limosa Color Café Oscuro con Emulsión
3	3	N.P.	N.P.	ML	Arena Limosa Color Café Oscuro con Emulsión

(*) CLASIFICACION SEGÚN CARTA DE PLASTICIDAD

Observaciones: Muestra proporcionado por el interesado.



Atentamente,

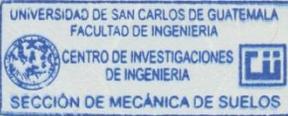
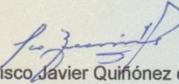
Omar E. Méndez Méndez
Ing. Omar Enrique Méndez Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

Vo.Bo. *Francisco Javier Quiñonez de la Cruz*
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>

Anexo 2. Informe de resultados de laboratorio de permeabilidad

	CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA	
		No. 11938
INFORME No.: 463 S.S.	O.T. No.: 37,682	
INTERESADO: Estuardo Alberto Divas Hidalgo		
PROYECTO: Trabajo de Graduación "Estabilización de Suelos con Emulsión Asfáltica Para el Empleo en Subbases y Bases"		
ASUNTO: Ensayo de Permeabilidad Cabeza Constante por el método de molde de pared rígida		
NORMA: ASTM D 5856-00		
UBICACIÓN: Sección Mecánica de Suelos		
MUESTRA No.: 2	PROFUNDIDAD:	X m
DESCRIPCIÓN DEL SUELO:	Arena Limosa Color Café Oscuro con Emulsión	
FECHA:	lunes, 9 de octubre de 2017	
<u>RESULTADO DEL ENSAYO:</u>		
COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD =	1.143 x 10⁻⁶ cm/s	
OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.		
	Atentamente,	
 Ing. Omar Enrique Medrano Mendez Jefe Sección Mecánica de Suelos	Vo. Bo.	 Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz DIRECTOR CII/USAC
<small>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</small>		

Anexo 3. Informe de resultados de laboratorio de Proctor modificado



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



No. 11939

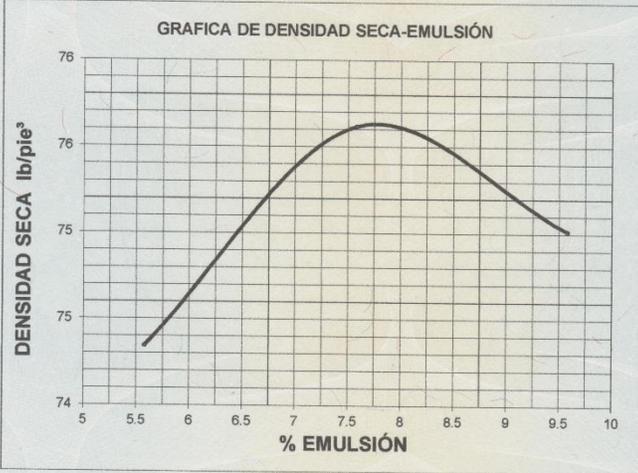
INFORME No. 464 S.S.

O.T.: 37,682

Interesado: Estuardo Alberto Divas Hidalgo
 Asunto: ENSAYO DE COMPACTACIÓN.
 Proyecto: Trabajo de Graduación "Estabilización de Suelos con Emulsión Asfáltica Para el Empleo en Subbases y Bases"
 Ubicación: Sección Mecánica de Suelos
 Fecha: lunes, 9 de octubre de 2017
 Muestra: 2

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

GRAFICA DE DENSIDAD SECA-EMULSIÓN



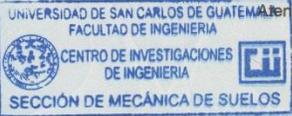
% Emulsión	Densidad Seca (lb/pe³)
5.5	74.5
6.0	75.2
6.5	75.8
7.0	76.3
7.5	76.5
7.80 (Hop)	76.6
8.0	76.5
8.5	76.0
9.0	75.5
9.5	75.0

Descripción del suelo: Area Limosa Color Café Oscuro con Emulsión

Densidad seca máxima γ_d : 1,211.91 Kg/m³ 75.65 lb/pe³

Emulsión óptima Hop.: 7.80 %

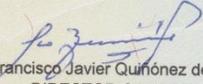
Observaciones: Muestra proporcionado por el interesado.



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

Vo. Bo.

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos



Ing. Francisco Javier Quirón 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>

Anexo 4. Informe de resultados de laboratorio de CBR



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



No. 11940

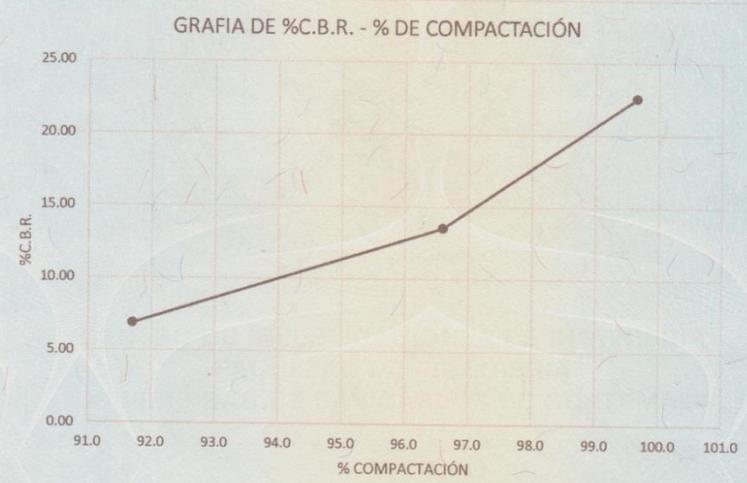
INFORME No. 465 S.S.

O.T. No. 37,682

Interesado: Estuardo Alberto Divas Hidalgo
 Asunto: Ensayo de Razón Soporte California (C.B.R.) Norma: A.A.S.H.T.O.T-193
 Proyecto: Trabajo de Graduación "Estabilización de Suelos con Emulsión Asfáltica Para el Empleo en Subbases y Bases"
 Ubicación: Sección Mecánica de Suelos Muestra: 2
 Descripción del suelo: Area Limosa Color Café Oscuro con Emulsión
 Fecha: lunes, 9 de octubre de 2017

PRÓBETA	GOLPES	A LA COMPACTACION		C	EXPANSION	C.B.R.
No.	No.	H (%)	γ _d (Lb/plie ³)	(%)	(%)	(%)
1	10	19.31	69.37	91.7	0.74	6.89
2	30	19.31	73.07	96.6	0.63	13.54
3	65	19.31	75.39	99.7	0.98	22.55

GRAFIA DE %C.B.R. - % DE COMPACTACIÓN



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 Quiñonez de la Cruz*
 Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz
 DIRECTOR CI/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>

Anexo 5. Informe de resultados de laboratorio de estabilidad y flujo Marshall



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



No. 12988

INFORME NUMERO: 008 L.B.A.

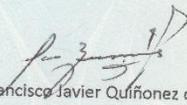
ORDEN DE TRABAJO: 37681

INTERESADO: ESTUARDO ALBERTO DIVAS HIDALGO
 PROYECTO: ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA PARA EL EMPLEO EN SUB BASES Y BASES
 DIRECCION: CII/USAC
 ENSAYO: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 6927
 FECHA: 06 DE MARZO DEL 2018
 MUESTRA: 3 MUESTRAS DE SUELO Y EMULSION ASFALTICA
 OBSERVACIONES: MUESTRA PROPORCIONADA POR EL INTERESADO

MUESTRA 1		
PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
1	776,60	10
2	881,50	11
3	1569,50	10

MUESTRA 2		
PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
1	1001,25	13
2	874,20	13
3	1112,50	10

MUESTRA 3		
PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
1	1109,80	10
2	979,00	11
3	1010,50	12

Vo. Bo. : 

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


Ing. Darío Francisco Lucas
Jefe Laboratorio de Asfalto




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>

