



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

**USO DE CAL HIDRATADA COMO RELLENO MINERAL PARA EL
MEJORAMIENTO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y PROPIEDADES
MECÁNICAS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE**

Javier Antonio del Cid Morales

Asesorado por el Ing. Yefry Valentín Rosales Juárez

Guatemala, octubre de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**USO DE CAL HIDRATADA COMO RELLENO MINERAL PARA EL
MEJORAMIENTO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y PROPIEDADES
MECÁNICAS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JAVIER ANTONIO DEL CID MORALES

ASESORADO POR EL ING. YEFRY VALENTÍN ROSALES JUÁREZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Juan Carlos Linares Cruz
EXAMINADOR	Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
EXAMINADOR	Ing. Daniel Alfredo Cruz Pineda
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:

USO DE CAL HIDRATADA COMO RELLENO MINERAL PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 6 de agosto de 2015.



Javier Antonio del Cid Morales

Guatemala, 20 de junio de 2016

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

Ingeniero Ordóñez:

Al saludarle cordialmente, me dirijo a usted para informarle que ha sido concluido satisfactoriamente el trabajo de graduación titulado: **“USO DE CAL HIDRATADA COMO RELLENO MINERAL PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE”** elaborado por el estudiante Javier Antonio del Cid Morales con carné 201020330, 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,


INGENIERO CIVIL
COLEGIADO 7177
Yefry Valentín Rosales Juárez

Msc. Ingeniero Civil Colegiado No. 7177



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

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

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala,
12 de agosto de 2016

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 **USO DE CAL HIDRATADA COMO RELLENO MINERAL PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Javier Antonio del Cid Morales 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

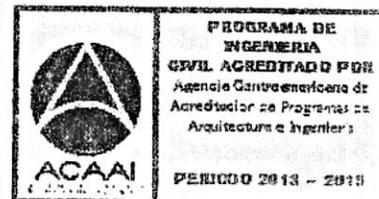


FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

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

/mrrm.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

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

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
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 del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación del estudiante Javier Antonio del Cid Morales, titulado **USO DE CAL HIDRATADA COMO RELLENO MINERAL PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, septiembre 2016
/mrrm.

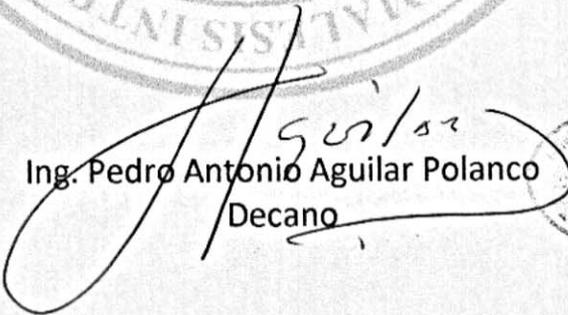
Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





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: **USO DE CAL HIDRATADA COMO RELLENO MINERAL PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE**, presentado por el estudiante universitario: **Javier Antonio del Cid Morales**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, octubre de 2016

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

- Mis padres** Roberto Antonio del Cid Monterroso y Flora Maricela Morales y Morales, por su amor, confianza, e incondicional apoyo en mi vida.
- Mi hermana** María Piedad del Cid Morales, que ha sido para mi un ejemplo a seguir, por el esfuerzo y dedicación que mostró en su carrera universitaria y que ahora muestra en su vida profesional.
- Mis abuelos (q. e. p. d.)** María del Carmen Morales Franco, José Luis Morales Paniagua, Rigoberto Antonio del Cid Donis, por el cariño y apoyo en mi vida.
- Mi abuela** Piedad Monterroso, por el cariño y apoyo en mi vida.
- Las familias** Morales y del Cid, por el apoyo que me han otorgado en el transcurso de mis estudios.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por ser el guía de mi vida, proveerme de fe y fortaleza para alcanzar esta meta y darme la oportunidad de compartir este triunfo con mis seres queridos.
- Mi asesor** Ing. Yefry Rosales, por su compromiso, dedicación y compartir sus conocimientos para la realización del presente trabajo de graduación.
- José Juan Istupe** Por su dedicación, compartir sus conocimientos y por su ayuda incondicional en la realización de los diferentes ensayos de laboratorio.
- Mis tías** Lusblanca Morales y Griselda Morales, por su cariño y apoyo incondicional en mi formación académica.
- Mi primo** Edgar Alfonso González Morales, por sus consejos y apoyo incondicional en mi formación académica.

**Mis amigos de la
Sección de Asfaltos**

Por su ayuda en la realización de los ensayos de laboratorio.

**Mis amigos de la
Facultad de Ingeniería**

Por su amistad y apoyo.

**Facultad de Ingeniería
de la Universidad de
San Carlos de
Guatemala**

Por ser mi casa de formación académica y profesional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Definiciones.....	1
1.1.1. Mezcla asfáltica	1
1.1.2. Mezcla asfáltica en caliente	2
1.1.3. Método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas.....	2
1.1.4. Procedimiento de ensayo Marshall.....	3
1.1.4.1. Gravedad específica bruta.....	4
1.1.4.2. Gravedad específica teórica máxima.....	4
1.1.4.3. Porcentaje de vacíos-densidad.....	4
1.1.4.4. Prueba de estabilidad-flujo Marshall.....	5
1.1.4.5. Valor de estabilidad Marshall.....	5
1.1.4.6. Valor de fluencia Marshall	6
1.1.5. Agregados en mezclas asfálticas	6
1.1.5.1. Requisitos	6
1.1.6. Material bituminoso.....	7
1.1.6.1. Requisitos	8
1.1.7. Relleno mineral para mezclas asfálticas.....	9

	1.1.7.1.	Requisitos.....	9
1.1.8.		Cal.....	9
	1.1.8.1.	Propiedades de la cal hidratada	10
	1.1.8.2.	Estabilizaciones con cal	10
1.2.		Descripción del experimento	11
1.2.1.		Diseño de mezcla asfáltica por el método Marshall.....	11
	1.2.1.1.	Metodología.....	12
	1.2.1.2.	Procedimiento para el diseño de mezcla	14
1.2.2.		Preparación de probetas de mezcla asfáltica tradicional.....	18
	1.2.2.1.	Metodología.....	18
		1.2.2.1.1. Equipo utilizado para calentar y mezclar agregados	19
	1.2.2.2.	Procedimiento de elaboración de probetas	20
1.2.3.		Preparación de probetas con adición de cal hidratada	22
	1.2.3.1.	Metodología.....	22
	1.2.3.2.	Procedimiento de elaboración de probetas de mezcla modificada.....	22
1.2.4.		Gravedad específica <i>bulk</i> de la mezcla asfáltica	23
	1.2.4.1.	Metodología.....	23
	1.2.4.2.	Procedimiento para determinar la gravedad específica <i>bulk</i>	25
1.2.5.		Gravedad específica bruta de los agregados	26
	1.2.5.1.	Metodología.....	26

1.2.5.2.	Procedimiento para determinar la gravedad específica bruta de los agregados.....	26
1.2.6.	Gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica	27
1.2.6.1.	Metodología.....	27
1.2.6.2.	Procedimiento para determinar la gravedad específica teórica máxima ...	30
1.2.7.	Gravedad específica efectiva de los agregados	32
1.2.7.1.	Metodología.....	32
1.2.7.2.	Procedimiento para determinar la gravedad específica efectiva	32
1.2.8.	Peso unitario de la mezcla asfáltica.....	35
1.2.8.1.	Metodología.....	35
1.2.8.2.	Procedimiento para determinar el peso unitario de la mezcla.	35
1.2.9.	Porcentaje de vacíos-densidad de la mezcla asfáltica	36
1.2.9.1.	Metodología.....	36
1.2.9.2.	Procedimiento para determinar el porcentaje de vacíos en la mezcla.....	36
1.2.10.	Porcentaje de vacíos en el agregado mineral.....	37
1.2.10.1.	Metodología.....	37
1.2.10.2.	Procedimiento para determinar el porcentaje de vacíos en el agregado mineral.....	38
1.2.11.	Porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico	38
1.2.11.1.	Metodología.....	39

1.2.11.2.	Procedimiento para determinar el porcentaje de vacíos llenados con asfalto.....	39
1.2.12.	Relación relleno mineral/asfalto	40
1.2.12.1.	Metodología.....	40
1.2.12.2.	Procedimiento para determinar la relación relleno mineral/asfalto.....	40
1.2.13.	Prueba de estabilidad-flujo Marshall	42
1.2.13.1.	Metodología.....	42
1.2.13.2.	Procedimiento para determinar la estabilidad y el flujo Marshall.....	44
1.2.14.	Contenido de humedad presente en la mezcla	45
1.2.14.1.	Metodología.....	46
1.2.14.2.	Procedimiento para determinar el contenido de humedad.....	46
2.	DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	49
2.1.	Resultados de los ensayos	49
2.1.1.	Gravedad específica <i>bulk</i>	49
2.1.1.1.	Resultados	50
2.1.2.	Gravedad específica bruta de los agregados.....	51
2.1.2.1.	Resultados	52
2.1.3.	Gravedad específica teórica máxima	53
2.1.3.1.	Resultados	53
2.1.4.	Gravedad específica efectiva de los agregados.....	54
2.1.4.1.	Resultados	55
2.1.5.	Peso unitario de la mezcla asfáltica	55
2.1.5.1.	Resultados	56
2.1.6.	Porcentaje de vacíos-densidad	57

2.1.6.1.	Resultados.....	57
2.1.7.	Porcentaje de vacíos en el agregado mineral.....	58
2.1.7.1.	Resultados.....	59
2.1.8.	Porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico	59
2.1.8.1.	Resultados.....	60
2.1.9.	Relación relleno mineral/asfalto.....	61
2.1.9.1.	Resultados.....	61
2.1.10.	Prueba de estabilidad-flujo Marshall.....	62
2.1.10.1.	Resultados.....	64
2.1.11.	Porcentaje de humedad.....	65
2.1.11.1.	Resultados.....	66
2.2.	Análisis de resultados.....	68
2.2.1.	Tabulación de resultados.....	68
2.2.2.	Interpretación de resultados	86
2.2.2.1.	Mezcla asfáltica tradicional.....	86
2.2.2.2.	Mezcla asfáltica con cal hidratada	88
2.2.3.	Beneficios del uso de cal hidratada en la mezcla asfáltica en comparación con una mezcla asfáltica tradicional	90
2.2.4.	Cantidad óptima de cal hidratada presente en una mezcla asfáltica	91
CONCLUSIONES		93
RECOMENDACIONES		97
BIBLIOGRAFÍA.....		99
APÉNDICES		101
ANEXOS.....		105

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Curva granulométrica del diseño de mezcla asfáltica tradicional	16
2.	Curva granulométrica del diseño de mezcla modificada	17
3.	Equipo utilizado para calentar agregados, cemento asfáltico y mezcla asfáltica.....	19
4.	Pedestal y martillo de compactación	20
5.	Balanza provista de dispositivo de suspensión	24
6.	Bomba de vacío	29
7.	Picnómetro para vacío y dispositivo de agitación.....	29
8.	Dispositivo para atrapar el vapor de agua.....	30
9.	Manómetro de presión residual.....	30
10.	Anillo dinamométrico y deformímetro de lectura fija.....	43
11.	Recipiente con control termostático	44
12.	Gráfico de gravedad específica <i>bulk</i> (mezcla tradicional)	69
13.	Gráfico de gravedad específica <i>bulk</i> (mezcla modificada)	70
14.	Gráfico de gravedad específica teórica máxima (mezcla tradicional) ..	71
15.	Gráfico de gravedad específica teórica máxima (mezcla modificada).....	71
16.	Gráfico de peso unitario (mezcla tradicional)	72
17.	Gráfico de peso unitario (mezcla modificada)	73
18.	Gráfico de porcentaje de vacíos-densidad (mezcla tradicional)	74
19.	Gráfico de porcentaje de vacíos-densidad (mezcla modificada)	74
20.	Gráfico de porcentaje de vacíos en el agregado mineral (mezcla tradicional).....	75

21.	Gráfico de porcentaje de vacíos en el agregado mineral (mezcla modificada)	76
22.	Gráfico de porcentaje de vacíos llenados con asfalto (mezcla tradicional)	77
23.	Gráfico de porcentaje de vacíos llenados con asfalto (mezcla modificada)	77
24.	Gráfico de relación relleno mineral/asfalto (mezcla tradicional)	78
25.	Gráfico de relación relleno mineral/asfalto (mezcla modificada)	79
26.	Gráfico de estabilidad Marshall (mezcla tradicional)	80
27.	Gráfico de estabilidad Marshall (mezcla modificada)	81
28.	Gráfico de flujo Marshall (mezcla tradicional)	82
29.	Gráfico de flujo Marshall (mezcla modificada)	82
30.	Gráfico de relación estabilidad-fluencia (mezcla tradicional)	83
31.	Gráfico de relación estabilidad-fluencia (mezcla modificada)	84
32.	Gráfico de porcentaje de humedad (mezcla tradicional)	85
33.	Gráfico porcentaje de humedad (mezcla modificada)	85

TABLAS

I.	Especificaciones del cemento asfáltico	8
II.	Requisitos para mezcla de concreto asfáltico	12
III.	Vacíos en el agregado mineral (VAM)	13
IV.	Graduación de agregados para pavimento de concreto asfáltico (ASTM D 3515)	14
V.	Diseño de mezcla asfáltica tradicional	15
VI.	Diseño de mezcla asfáltica modificada	17
VII.	Procedimiento para elaborar probetas de mezcla asfáltica tradicional	20
VIII.	Procedimiento para determinar la gravedad específica <i>bulk</i>	25

IX.	Procedimiento para determinar la gravedad específica bruta de los agregados	26
X.	Procedimiento para determinar la gravedad específica teórica máxima.....	31
XI.	Procedimiento para determinar la gravedad específica efectiva de los agregados	33
XII.	Procedimiento para determinar el peso unitario de la mezcla	35
XIII.	Procedimiento para determinar el porcentaje de vacíos	37
XIV.	Procedimiento para determinar el porcentaje de vacíos en el agregado mineral	38
XV.	Procedimiento para determinar el porcentaje de vacíos llenados con asfalto.....	39
XVI.	Procedimiento para determinar la relación relleno mineral/asfalto	40
XVII.	Procedimiento para determinar la estabilidad y flujo Marshall.....	44
XVIII.	Procedimiento para determinar el contenido de humedad en la mezcla.....	46
XIX.	Resultados de gravedad específica <i>bulk</i> (mezcla tradicional).....	50
XX.	Resultados de gravedad específica <i>bulk</i> (mezcla modificada).....	51
XXI.	Resultados de gravedad específica bruta de los agregados	52
XXII.	Resultados de gravedad específica teórica máxima	53
XXIII.	Resultados de gravedad específica efectiva de los agregados.....	55
XXIV.	Resultados de peso unitario de la mezcla asfáltica	56
XXV.	Resultados de porcentaje de vacíos-densidad.....	57
XXVI.	Resultados de porcentaje de vacíos en el agregado mineral	59
XXVII.	Resultados de porcentaje de vacíos llenados con asfalto	60
XXVIII.	Resultados de relación relleno mineral/asfalto (mezcla tradicional)	61
XXIX.	Resultados de relación relleno mineral/asfalto (mezcla modificada)	62
XXX.	Resultados de estabilidad-flujo Marshall (mezcla tradicional)	64
XXXI.	Resultados de estabilidad-flujo Marshall (mezcla modificada)	65

XXXII.	Resultados de porcentaje de humedad (mezcla tradicional).....	66
XXXIII.	Resultados de porcentaje de humedad (mezcla modificada).....	67
XXXIV.	Cuadro comparativo de gravedad específica <i>bulk</i>	69
XXXV.	Cuadro comparativo de gravedad específica teórica máxima.....	70
XXXVI.	Cuadro comparativo de peso unitario de la mezcla asfáltica	72
XXXVII.	Cuadro comparativo de porcentaje de vacíos-densidad	73
XXXVIII.	Cuadro comparativo de porcentaje de vacíos en el agregado mineral	75
XXXIX.	Cuadro comparativo de porcentaje de vacíos llenados con asfalto	76
XL.	Cuadro comparativo de relación relleno mineral/asfalto	78
XLI.	Cuadro comparativo de estabilidad Marshall	79
XLII.	Cuadro comparativo de flujo Marshall.....	81
XLIII.	Cuadro comparativo de relación estabilidad-fluencia.....	83
XLIV.	Cuadro comparativo de porcentaje de humedad	84

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cS	<i>centiStokes</i>
Deflt	Deformación igual a 0,0001”
G_{sb}	Gravedad específica bruta de la combinación de agregados.
G_{mb}	Gravedad específica <i>bulk</i> de la mezcla asfáltica
G_{cal}	Gravedad específica de la cal hidratada
G_{fino}	Gravedad específica del agregado fino
G_{grueso}	Gravedad específica del agregado grueso
G_{ac}	Gravedad específica del ligante asfáltico
G_{se}	Gravedad específica efectiva de los agregados
G_{mm}	Gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica.
Ca (OH)₂	Hidróxido de calcio
kPa	Kilopascal
lbf	Libras-fuerza
A	Masa del espécimen de mezcla asfáltica
B	Masa del espécimen de mezcla asfáltica saturado y con superficie seca.
C	Masa del espécimen de mezcla asfáltica sumergido en agua.
E	Masa del picnómetro con la muestra y lleno de agua
D	Masa del picnómetro lleno de agua

mm Hg	Milímetros de mercurio
Pa-s	Pascales-segundo
P_s	Porcentaje de agregado en la mezcla
P_{fino}	Porcentaje de agregado fino en la combinación de agregados.
P_{grueso}	Porcentaje de agregado grueso en la combinación de agregados.
P_{cal}	Porcentaje de cal en la combinación de agregados
P_{ba}	Porcentaje de cemento asfáltico absorbido
P_{be}	Porcentaje de cemento asfáltico efectivo
% H	Porcentaje de humedad
P_{ac}	Porcentaje de ligante asfáltico en relación al total de la masa de la mezcla.
VA	Porcentaje de vacíos
VAM	Porcentaje de vacíos en el agregado mineral
VFA	Porcentaje de vacíos llenados con ligante asfáltico
<i>psi</i>	<i>Pounds-force per square inch</i> (libras-fuerza por pulgada cuadrada).

GLOSARIO

AC	<i>Asphalt cement.</i>
Aglomerante	Material que en estado pastoso y con consistencia variable, es capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto.
Agregado pétreo	Agregado proveniente de la trituración de roca, de piedra o de un peñasco.
Anillo dinamométrico	Instrumento utilizado para conocer la carga de compresión aplicada en una máquina de ensayo.
Bomba de vacío	Máquina utilizada para extraer, impulsar o elevar moléculas de gas de un volumen sólido.
Cal apagada	Óxido de calcio al cual se le ha incorporado moléculas de agua para formar un hidróxido.
Cal viva	Compuesto obtenido de la trituración de piedra caliza de alta pureza.
Cemento asfáltico	Aglomerante proveniente de la fracción pesada de la destilación del petróleo crudo.

Contenido de asfalto	Cantidad de asfalto que se adiciona a la mezcla de agregados pétreos para obtener las cualidades deseadas de la mezcla.
Deformímetro	Instrumento que mide desplazamientos lineales.
Densidad	Relación que existe entre la masa y el volumen que ocupa una sustancia.
ESAL	<i>Equivalent simple axial load</i> (factor de equivalencia de carga).
Estabilidad	Capacidad de la mezcla asfáltica para resistir desplazamiento y deformación bajo la aplicación de carga.
Fluencia	Deformación en centésimas de pulgada de la briqueta, bajo la carga de estabilidad Marshall.
Granulometría	Distribución de los diferentes tamaños de las partículas de un agregado.
Gravedad específica	Propiedad obtenida de la comparación de la densidad de una sustancia con la densidad de una sustancia patrón.
INV	Instituto Nacional de Vías de Colombia.

Ligante	Material cuya función es de pegar o unir partículas de otros materiales.
Manómetro	Instrumento utilizado para medir la presión de un fluido, especialmente de los gases.
Milímetros de mercurio	Presión ejercida en la base de una columna de un milímetro de altura de mercurio.
Pavimento flexible	Constituido con un material bituminoso como aglomerante y agregados pétreos.
Picnómetro	Instrumento de medición utilizado para conocer la densidad o peso específico de un fluido líquido o sólido.
Poise	Unidad de viscosidad dinámica que equivale a un dina sobre una superficie de un centímetro cuadrado.
Polvo mineral	Material que pasa el tamiz núm. 200 utilizado como relleno mineral en la mezcla asfáltica.
Probeta	Pieza sometida a ensayos para estudio del material del que está hecha.
Vacíos de aire	Espacios pequeños de aire o bolsas de aire, que están presentes entre las partículas de la mezcla asfáltica.

Válvula de purga

Utilizada para absorber los vapores de combustible del recipiente de vapor.

Viscosidad

Medida de la resistencia a la deformación de un fluido producida por fuerzas cortantes.

RESUMEN

El presente trabajo contiene un estudio comparativo entre la mezcla asfáltica tradicional y la asfáltica modificada con cal hidratada. Esta comparación es útil para conocer el comportamiento de la mezcla modificada y así determinar si la cal puede cumplir tanto la función de relleno mineral como de posible aditivo en la mezcla.

Como primer punto se desarrolla el marco teórico, aquí se presenta toda la teoría que ha sido útil para la realización de este trabajo. En esta sección se encuentran definiciones de materiales y ensayos. Así también, se presenta la descripción de la metodología y procedimiento que se ha utilizado para el desarrollo de los diferentes ensayos que se realizaron.

Posterior al marco teórico se encuentra el desarrollo experimental. En este se presentan los datos obtenidos en los ensayos y los cálculos correspondientes a los mismos. Posteriormente se describe una tabulación de los resultados y una representación gráfica de los datos de cada uno de los ensayos, esto con el fin de comparar con mayor facilidad los resultados obtenidos de la mezcla asfáltica tradicional con los resultados de la mezcla asfáltica modificada.

Por último, se presenta el análisis de los resultados, en donde se indica las ventajas y desventajas que conllevó la utilización de la cal hidratada como relleno mineral en la mezcla asfáltica.

OBJETIVOS

General

Realizar una mezcla asfáltica modificada con la incorporación de cal hidratada, para determinar si el uso de la misma en la mezcla puede cumplir la función tanto de relleno mineral para el llenado de vacíos, como de aditivo para el mejoramiento de las características físicas y propiedades mecánicas de la mezcla.

Específicos

1. Realizar dos tipos de mezcla asfáltica, una asfáltica tradicional y otra en donde se incorpore cal hidratada en una cantidad de 1,5 % del peso total de la mezcla de agregados.
2. Comprobar si el uso de cal hidratada en la mezcla asfáltica, en una cantidad de 1,5 % del peso de los agregados, es una cantidad adecuada para que la cal mejore las características físicas y propiedades mecánicas de la mezcla.
3. Comparar los resultados obtenidos en los ensayos realizados, para poder determinar diferencias entre las características y propiedades de la mezcla asfáltica tradicional y la asfáltica con cal hidratada.

4. Identificar los beneficios y desventajas que conlleva la incorporación de cal hidratada como llenante de vacíos en la mezcla asfáltica.

INTRODUCCIÓN

La mezcla asfáltica se emplea en la conformación de pavimentos, esta puede ser utilizada como carpeta de rodadura o en capas inferiores. La que comúnmente se utiliza como pavimento, es la mezcla asfáltica tradicional en caliente. Mezcla que resulta de la combinación de cemento asfáltico con agregados minerales pétreos en proporciones exactas. Las proporciones relativas utilizadas de los materiales en la mezcla asfáltica, son las que determinan las características físicas y propiedades mecánicas de la mezcla. Sin embargo, estas propiedades pueden ser modificadas si existe la presencia de un aditivo en la mezcla.

La demanda de un pavimento de mejor calidad y de mayor durabilidad, ha llevado a buscar alternativas para modificar las cualidades de la mezcla asfáltica tradicional. Por ello, se ha decidido realizar un estudio en el que se incorporará a la mezcla asfáltica, cal hidratada. Compuesto que podría cumplir la función tanto de relleno mineral para el llenado de vacíos, como de aditivo para el mejoramiento de la calidad de la mezcla.

Para comprobar los beneficios del uso de cal hidratada en la mezcla, se realizará dos tipos de mezclas. Una mezcla asfáltica tradicional y una con la adición de cal hidratada. Los dos tipos de mezclas serán sometidos a los ensayos que se indican en el método Marshall para mezclas asfálticas. Con esto, se podrá comparar los resultados de dichos ensayos, para así poder conocer las diferencias entre las mezclas y determinar si la cal hidratada puede cumplir la función tanto de relleno mineral como de aditivo.

Por medio del análisis de los resultados y de la comparación entre los dos tipos de mezcla, se indicarán las posibles desventajas o beneficios que conlleva la incorporación de cal hidratada, con el objetivo de que, en un futuro sea este compuesto una alternativa para el mejoramiento de la calidad de la mezcla asfáltica en caliente.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Definiciones

En esta sección se presentan definiciones de mezclas, materiales, ensayos y toda la teoría relacionada con las normas y especificaciones que han sido utilizadas para la realización del presente trabajo.

1.1.1. Mezcla asfáltica

Es el resultado de la combinación de cemento asfáltico, agregados pétreos y polvo mineral, en proporciones estrictamente controladas, para obtener un producto de alta resistencia y durabilidad. El cemento asfáltico es el material que cumple la función de aglomerante, es viscoso, de alta densidad y está compuesto de la mezcla de sustancias orgánicas. Los agregados pétreos utilizados, son el producto de una mezcla de agregados áridos y agregados finos. Por su parte, el polvo mineral cumple con la función de llenado de vacíos en la mezcla.

Estos componentes y las cantidades en las que estén presentes en la mezcla, determinan el correcto funcionamiento del pavimento y su calidad. El cemento asfáltico y el polvo mineral, son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla, como en su costo total.

1.1.2. Mezcla asfáltica en caliente

Esta se produce cuando se genera un aumento en la temperatura de la mezcla. Se fabrica con asfalto en proporciones que pueden variar de 3 a 6 % del peso total de agregados pétreos de la mezcla.

Su proceso de fabricación se lleva a cabo al calentar el cemento asfáltico a una temperatura entre 110 a 130 °C y los agregados pétreos a una temperatura entre 140 a 150 °C. Después que el material pétreo esté caliente y seco, se mezclan sus componentes de acuerdo a una composición granulométrica previamente establecida (diseño de mezcla). Posteriormente se incorpora el cemento asfáltico a la mezcla de agregados minerales, en una cantidad previamente definida.

Las mezclas asfálticas en caliente trabajan bien debido a que son diseñadas, producidas y colocadas de tal manera, que se logre obtener las propiedades deseadas. Existen varias propiedades que contribuyen a la buena calidad del pavimento de este tipo de mezcla, entre las cuales se pueden mencionar; estabilidad, durabilidad, impermeabilidad, trabajabilidad, flexibilidad, resistencia a la fatiga y resistencia al deslizamiento.

La puesta en obra de la mezcla se realiza a temperaturas muy superiores a la del ambiente, pues de lo contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún, compactarse adecuadamente.

1.1.3. Método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas

Este método es aplicable únicamente al diseño de mezclas asfálticas en caliente que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1"). El

propósito del método es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. Cabe mencionar que, este proceso de diseño no tiene especificado pruebas para agregados minerales ni para cementos asfálticos.

El método provee información sobre propiedades que debe de poseer la mezcla asfáltica, establece valores de densidades y contenidos óptimos de vacíos, que deben ser cumplidos durante la realización de la mezcla.

El método Marshall se basa en un experimento de laboratorio, dirigido al diseño de una mezcla asfáltica adecuada. Esto se obtiene a través del análisis de la estabilidad, fluencia, densidad y vacíos en la mezcla. El análisis de la relación vacíos-densidad y la prueba de estabilidad-flujo de las muestras compactadas, son los datos más importantes del diseño por medio de este método.

1.1.4. Procedimiento de ensayo Marshall

El procedimiento está basado en la Norma ASTM D 1559. Esta describe el procedimiento que se debe emplear para la determinación de la resistencia a la deformación plástica del espécimen cilíndrico de mezcla asfáltica en caliente.

Consiste en realizar los siguientes ensayos de prueba: gravedad específica bruta y teórica, porcentaje de vacíos-densidad y estabilidad-flujo Marshall, este último ensayo está relacionado con la carga que soporta el espécimen al llegar a la falla y la deformación que sufre con dicha carga.

1.1.4.1. Gravedad específica bruta

También conocida como gravedad específica *bulk*, representa la gravedad específica neta para el agregado total de la mezcla. Es la relación entre la masa de un volumen dado de material y la masa de un volumen igual de agua destilada, libre de gas, a la misma temperatura.

Se calcula a partir de la relación que existe entre el peso de la muestra seca al aire y la diferencia entre el peso de la muestra saturada de agua y el peso de la muestra sumergida en el agua a temperatura ambiente. Esta gravedad representa la gravedad que debe tener la mezcla colocada en campo.

1.1.4.2. Gravedad específica teórica máxima

Es un valor que está afectado por la composición de la mezcla, en términos del tipo, cantidad de agregados y del material asfáltico de una muestra sin compactar, a temperatura ambiente.

El objetivo principal de conocer la gravedad específica teórica máxima, es determinar el porcentaje de vacíos de aire presente en la mezcla.

1.1.4.3. Porcentaje de vacíos-densidad

Representa los espacios de aire entre las partículas de agregado en la mezcla asfáltica compactada. El porcentaje del volumen de vacíos puede determinarse por medio de una ecuación que relaciona la gravedad específica *bulk* con la gravedad específica teórica máxima de la muestra.

La relación vacíos-densidad es una de las propiedades que cobra mayor importancia, ya que el análisis de esta relación, garantiza que las proporciones volumétricas de los materiales de la mezcla estén dentro de rangos adecuados para asegurar una mezcla de buena calidad.

1.1.4.4. Prueba de estabilidad-flujo Marshall

El ensayo de estabilidad se realiza con el objetivo de medir la resistencia a la deformación plástica de la muestra compactada. La fluencia mide la deformación bajo carga que experimenta la mezcla.

Para la prueba se utilizan especímenes estándar de 64 mm (2 ½”) de alto y 102 mm (4”) de diámetro. Se preparan mediante un procedimiento en el que se calienta, se combina y se compacta la mezcla de cemento asfáltico, agregados y polvo mineral.

1.1.4.5. Valor de estabilidad Marshall

Es la medida de la carga bajo la cual una probeta cede o falla totalmente. Durante el ensayo, cuando la carga es aplicada lentamente, los cabezales superior e inferior del aparato se acercan y la carga sobre la briqueta aumenta, al igual que la lectura en el indicador de cuadrante. Luego se suspende la aplicación de carga, una vez que se obtiene la carga de falla. Se calcula el equivalente en libras-fuerza de la carga máxima leída en el medidor, este dato es el valor de estabilidad Marshall, el cual representa la resistencia de la mezcla.

1.1.4.6. Valor de fluencia Marshall

Representa la deformación de la muestra compactada, medida en centésimas de pulgada (0,01"). La deformación está indicada por la disminución en el diámetro vertical de la briqueta.

Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y valores altos de estabilidad Marshall, son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas, y tienen tendencia a deformarse fácilmente bajo las cargas de tránsito.

1.1.5. Agregados en mezclas asfálticas

Los agregados pétreos empleados para la realización de mezcla asfáltica en caliente, deberán poseer una naturaleza tal que, al aplicarles una capa de material asfáltico, esta no se desprenda por la acción combinada del agua y del tránsito.

1.1.5.1. Requisitos

Los requisitos que deben cumplir los agregados en la mezcla asfáltica son los siguientes:

- Agregado grueso

Material retenido en el tamiz de 4,75 mm de abertura, que cumpla con los requisitos indicados en la Norma ASTM D 692. El agregado deberá proceder de la trituración de piedra de cantera o de grava natural o por una combinación de

ambas. Sus fragmentos deberán ser limpios, resistentes y durables, sin exceso de partículas planas, alargadas, blandas o desintegrables. Deberá estar libre de polvo, tierra, terrones de arcilla u otras sustancias, que puedan impedir la adhesión del cemento asfáltico o afecten adversamente la durabilidad de la mezcla compactada.

- Agregado fino

Material que pasa el tamiz de 4,75 mm de abertura, que cumpla con los requisitos indicados en la Norma ASTM D 1073. El agregado deberá proceder en su totalidad de la trituración de piedra de cantera o de grava natural o parcialmente de fuentes naturales de arena. Los granos del agregado fino deberán ser duros, limpios y de superficie rugosa y angular. El material deberá estar libre de cualquier sustancia que impida la adhesión del cemento asfáltico a las partículas de agregado.

1.1.6. Material bituminoso

El cemento asfáltico es un material bituminoso, preparado a partir de hidrocarburos naturales. Se obtiene mediante procesos de destilación y refinación del petróleo. Es un ligante flexible, impermeable y duradero. Mediante la aplicación de calor disminuye su viscosidad, permitiendo mezclarse con agregados pétreos.

El cemento asfáltico se presenta como una masa negra y brillante, que posee propiedades aglomerantes. Se clasifica según su viscosidad absoluta medida a 60 °C y expresada en *poise*.

1.1.6.1. Requisitos

Según se indica en las *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*, de la Dirección General de Caminos, el tipo, grado, y especificación del cemento asfáltico debe de ser uno de los establecidos como se muestra en la tabla I.

Tabla I. **Especificaciones del cemento asfáltico**

Tipo y grado del cemento asfáltico	Especificación
Graduación por viscosidad <ul style="list-style-type: none">• AC – 10• AC – 20• AC – 40	AASHTO M 226
Graduación por penetración <ul style="list-style-type: none">• 40-50• 60-70• 85-100• 120-150	AASHTO M 20

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

Nota: Para realizar los estudios del presente trabajo, se ha elegido el tipo de cemento asfáltico por su graduación por viscosidad, siendo este el cemento asfáltico AC-20. Debido a que es el que comúnmente se utiliza para la realización de pavimentos flexibles en Guatemala.

1.1.7. Relleno mineral para mezclas asfálticas

El relleno mineral es la porción del agregado que pasa el tamiz núm. 200 y es utilizado para el llenado de vacíos de la mezcla.

1.1.7.1. Requisitos

Deberá cumplir con los requisitos indicados en la Norma ASTM D 242. El material deberá provenir de los procesos de trituración y clasificación de los agregados pétreos o del colector de polvo mineral de la planta mezcladora, o podrá ser un producto comercial, generalmente cal hidratada o cemento Portland, que cumpla con la norma antes mencionada.

Solo una parte del llenante mineral podrá proceder directamente de los agregados pétreos y llegar junto con ellos al tambor de mezcla. El resto del llenante mineral deberá proceder de los agregados pétreos o, ya sea que se utilice otro producto preparado para este fin. Deberá ser introducido al tambor de mezcla en forma separada como un agregado más.

1.1.8. Cal

La cal o cal viva es el compuesto químico con que comúnmente se le llama al óxido de calcio. Se obtiene como resultado de la calcinación de la roca caliza. Se da la posibilidad de agregar agua a la cal, obteniendo así un compuesto químico hidratado al cual se le denomina cal apagada, hidróxido de calcio o cal hidratada.

1.1.8.1. Propiedades de la cal hidratada

Las propiedades de la cal hidratada que hacen que sea posible su uso en la construcción, están relacionadas con su resistencia, el tiempo de fraguado, la consistencia de las mezclas a base de este material y la reacción química que se produce al tener contacto con otros materiales de construcción, que mejora la calidad de estos.

Las propiedades, como la resistencia y el tiempo de fraguado, están íntimamente relacionadas con la composición química de la cal. La composición química varía dependiendo de las impurezas contenidas en la materia prima, por ejemplo, la roca caliza puede contener arcillas, hierro, azufre, carbonatos de magnesio, álcalis y otras impurezas que afectan la reactividad de la cal con el agua.

1.1.8.2. Estabilizaciones con cal

Los suelos arcillosos son suelos que tienden a experimentar cambios volumétricos, debido a la variación de humedad y temperatura a la que están expuestos. Esto hace que sean suelos inestables y deficientes para la construcción. Debido a esto, años atrás, se ha estabilizado químicamente el suelo por medio de la incorporación de cal para mejorar sus propiedades mecánicas.

La estabilización se puede dar en carreteras como en cimentaciones en general. En un suelo arcilloso promedio, para lograr estabilizarlo se utiliza aproximadamente 25 kg de cal hidratada por metro cúbico de suelo. Para determinar la cantidad de cal necesaria para lograr la estabilización, se deben llevar a cabo pruebas de laboratorio en donde se determine la acidez o

alcalinidad del suelo, esto se mide por el potencial hidrógeno del mismo. Los porcentajes de cal utilizados comúnmente se encuentran entre un 2 a un 8 % del peso del material.

Para lograr una estabilización del suelo, debe utilizarse cal viva o cal hidratada con alto contenido de calcio. Al utilizar cal viva, se debe asegurar una suficiente cantidad de agua para que la misma se hidrate adecuadamente. Para que la estabilización se lleve a cabo el sistema suelo-cal-agua debe alcanzar un pH mínimo de 11.

En carreteras se llega a especificar el uso de la cal hidratada para la estabilización de base y subbases. En este caso, la cal reacciona químicamente con la sílice y la alúmina de los finos, formándose silicatos y aluminatos de calcio. Estos son agentes cementantes que aglutinan a las partículas más grandes.

1.2. Descripción del experimento

En esta sección se presentan las metodologías y procedimientos de los ensayos que se deben realizar a la mezcla asfáltica en caliente.

1.2.1. Diseño de mezcla asfáltica por el método Marshall

A continuación se presenta la metodología y el procedimiento para realizar un diseño de mezcla asfáltica utilizando el método Marshall.

1.2.1.1. Metodología

Las normas a utilizar para el diseño de mezcla son las siguientes:

- ASTM D 1559: método de ensayo de resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas utilizando el aparato Marshall, por sus siglas en inglés, *test method for resistance of plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus*.
- INV E 748: estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall.
- AASHTO T 245: resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas utilizando el aparato Marshall, por sus siglas en inglés, *resistance to plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus*.

Según lo indicado en las *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*, de la Dirección General de Caminos, la mezcla asfáltica diseñada por el método Marshall deberá cumplir con los parámetros indicados en la tabla II.

Tabla II. **Requisitos para mezcla de concreto asfáltico**

MÉTODO DE DISEÑO	VALORES LÍMITES	
	Mínimo	Máximo
MARSHALL (AASHTO T245)		
Temperatura de compactación (generalmente comprendida entre 130 y 140 °C) de pastilla para producir una viscosidad de	0,25 Pa-s o 250 cS	0,31 Pa-s o 310 cS
Número de golpes de compactación en cada extremo del espécimen	75	75
Estabilidad	5 338 N (1 200 libras)	

Continuación de la tabla II.

Fluencia en 0,25 mm (0,01 pulg.)		
• Tránsito < 106 ESAL	8	16
• Tránsito > 106 ESAL	8	14
Relación estabilidad fluencia (lb/0,01 pulg)	120	275
Porcentaje de vacíos de la mezcla compactada	3	5
Porcentaje de vacíos en agregado mineral (VAM)	ver tabla III	
Porcentaje de vacíos rellenos con asfalto		
• Tránsito < 106 ESAL	65	78
• Tránsito > 106 ESAL	65	75
Relación finos bitumen	0,6	1,6
Sensibilidad a la humedad AASHTO T283	80 %	
Resistencia retenida		
Partículas recubiertas con bitumen, para definir tiempo de mezclado AASHTO T195	95 %	

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Vacíos en el agregado mineral (VAM)**

Tamaño nominal máximo del agregado (mm)	Porcentaje de vacíos del agregado mineral (VAM)			
	Método Marshall			Método Superpave
	3 %	4 %	5 %	4 %
9,50	14	15	16	15
12,50	13	14	15	14
19,00	12	13	14	13
25,00	11	12	13	12
37,50	10	11	12	11
50,00	9,50	10,50	11,5	No aplicable

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes.* p. 303.

1.2.1.2. Procedimiento para el diseño de mezcla

El diseño de la mezcla asfáltica por el método Marshall, parte de la graduación de agregados indicada en la Norma ASTM D 3515. En esta se presentan los valores máximos y mínimos en los cuales debe estar comprendida la curva granulométrica de los agregados de la mezcla.

Como primer paso se define cuál será el tamaño máximo de agregado que se utilizará. Con base en este dato se utiliza la tabla IV para conocer los valores máximos y mínimos de los porcentajes en masa que pasa la serie de tamices utilizados.

Posteriormente queda a criterio del diseñador elegir los valores de porcentaje que pasa para cada tamiz, y así construir la curva granulométrica, siendo esta el diseño de mezcla asfáltica.

Tabla IV. **Graduación de agregados para pavimento de concreto asfáltico (ASTM D 3515)**

Tamaño del tamiz (mm)	Porcentaje en masa que pasa el tamiz designado (AASHTO T 27 y T 11)					
	Graduación designada y tamaño máximo nominal					
	A	B	C	D	E	F
	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"
63,00	100					
50,00	90-100	100				
38,10	-	90-100	100			
25,00	60-80	-	90-100	100		
19,00	-	56-80	-	90-100	100	

Continuación de la tabla IV.

12,50	35-65	-	56-80	-	90-100	100
9,50	-	-	-	56-80	-	90-100
4,75	17-47	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85
2,36	10-36	15-41	19-45	23-49	25-58	32-67
0,30	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23
0,075	0-5	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. p. 298.

Nota: Para el caso en estudio del presente trabajo, se ha elegido realizar una mezcla asfáltica tipo D, por lo tanto, el tamaño máximo del agregado será de 3/4".

En las tablas V y VI se presenta los valores propuestos de porcentaje en masa que pasa cada tamiz, estos valores representan el diseño de la mezcla asfáltica con la cual se realizarán los diferentes estudios de este trabajo. Así también, se indica el respectivo porcentaje de masa retenido en cada tamiz, este dato es utilizado para conocer la cantidad en peso que representará cada tamaño de agregado en la mezcla total de agregados, la cual debe tener un peso total de 1 200 g.

Tabla V. **Diseño de mezcla asfáltica tradicional**

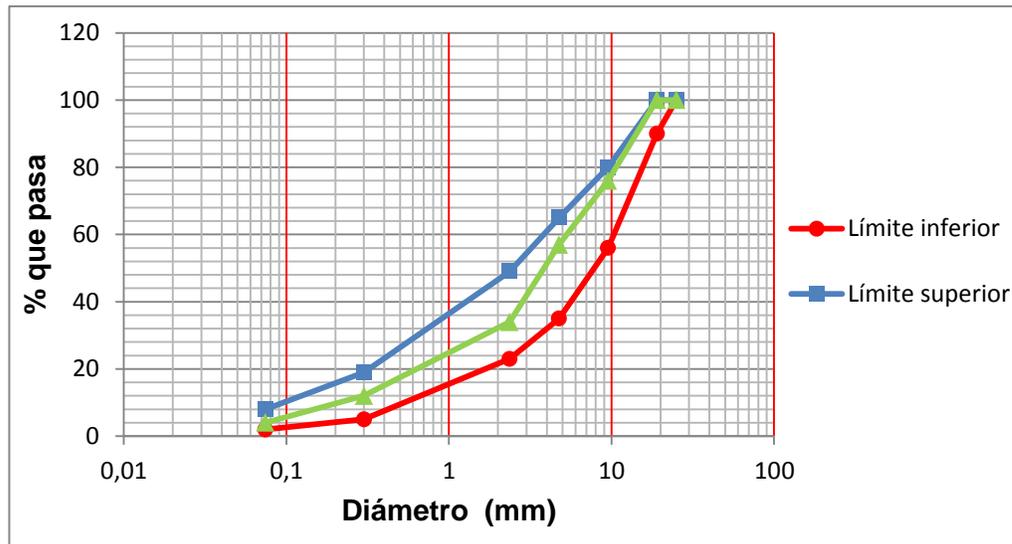
Tamaño de tamiz (mm)	Porcentaje en masa que pasa el tamiz	Porcentaje acumulado de masa retenido en el tamiz	Cantidad en peso para la mezcla (g)
25,00	100	100	0

Continuación de la tabla V.

19,00	100	100	0
9,50	76	24	288,00
4,75	57	19	228,00
2,36	34	23	276,00
0,30	12	22	264,00
0,075	4	8	96,00
Fondo		4	48,00
Total			1 200,00

Fuente: elaboración propia.

Figura 1. **Curva granulométrica del diseño de mezcla asfáltica tradicional**



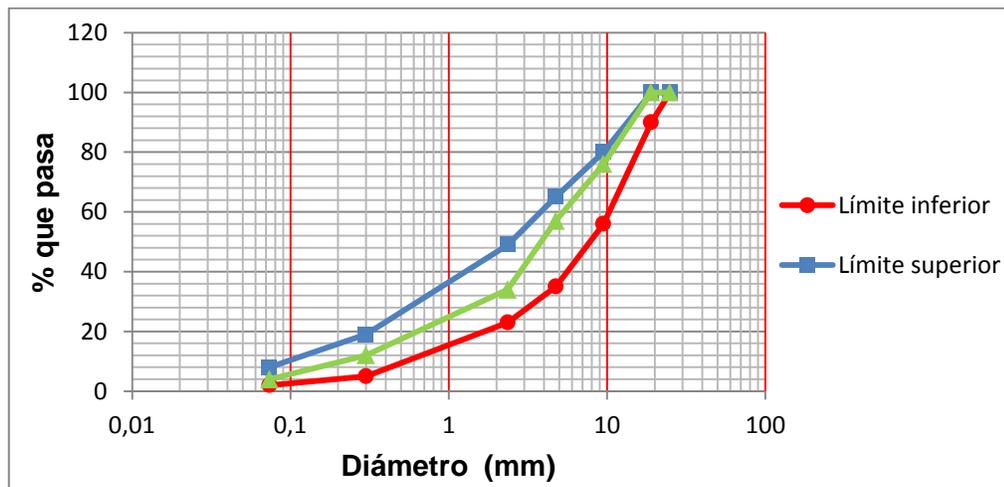
Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

Tabla VI. **Diseño de mezcla asfáltica modificada**

Tamaño de tamiz (mm)	Porcentaje en masa que pasa el tamiz	Porcentaje acumulado de masa retenido en el tamiz	Cantidad en peso para la mezcla (g)
25,00	100	100	0
19,00	100	100	0
9,50	76	24	288,00
4,75	57	19	228,00
2,36	34	23	276,00
0,30	12	22	264,00
0,075	4	8	96,00
Fondo		2,50	30,00
Cal		1,50	18,00
Total			1 200,00

Fuente: elaboración propia.

Figura 2. **Curva granulométrica del diseño de mezcla modificada**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

1.2.2. Preparación de probetas de mezcla asfáltica tradicional

A continuación se presenta la metodología y el procedimiento para la elaboración de probetas de mezcla asfáltica tradicional.

1.2.2.1. Metodología

La norma a utilizar para la realización de las probetas es la siguiente:

- INV E 748: estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall

El equipo a utilizar es el siguiente:

- Horno.
- Placa de calefacción.
- Termómetros adecuados para medir la temperatura del asfalto, los agregados y la mezcla.
- Balanza para pesar material y probetas compactadas.
- Tamices.
- Recipiente para mezclar.
- Cucharones o espátulas.
- Molde cilíndrico con collar de extensión y placa de base plana para moldear probetas.
- Martillo de compactación de operación manual: consiste en un dispositivo de acero con una base plana circular de compactación con una articulación de resorte y un pisón deslizante de 4,54 kg de masa total, montado de tal forma que proporcione una altura de caída de $457,2 \pm 1,5$ mm.

- Pedestal de compactación: pieza prismática de madera de base cuadrada, de 203,2 mm de lado y 457,2 mm de altura. Provista en su cara superior con una platina cuadrada de acero de 304,8 mm de lado y 25,4 mm de espesor, esta debe estar firmemente sujeta al pedestal.
- Dispositivo con resorte de tensión: diseñado para centrar rigidamente el molde de compactación sobre el pedestal. Debe sostener en su posición el molde, el collar y la placa de base durante la compactación de la probeta.

1.2.2.1.1. Equipo utilizado para calentar y mezclar agregados

En la figura 3 se muestra el equipo e instrumentos utilizados para calentar y mezclar los agregados pétreos con el cemento asfáltico.

Figura 3. **Equipo utilizado para calentar agregados, cemento asfáltico y mezcla asfáltica**



Fuente: Sección de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 4. **Pedestal y martillo de compactación**



Fuente: Sección de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

1.2.2.2. Procedimiento de elaboración de probetas

En la tabla VII se muestra el procedimiento para la elaboración de probetas de mezcla asfáltica tradicional.

Tabla VII. **Procedimiento para elaborar probetas de mezcla asfáltica tradicional**

1. Para una graduación de agregado previamente establecida, preparar una serie de probetas con diferentes contenidos de asfalto, desde un 4 hasta un 6 % (con incrementos de 0,5 % en masa entre ellos), del peso total de la mezcla de agregados. Se prepararán tres probetas para cada contenido de asfalto. Por lo tanto, se necesita realizar, por lo menos quince probetas por cada diseño de mezcla. Para cada probeta se utilizan 1 200 g de mezcla de agregados, incluyendo el relleno mineral.

Continuación de la tabla VII.

2. Secar los agregados y separar por tamizado en fracciones de diferentes tamaños.
3. Calentar el cemento asfáltico a una temperatura correspondiente para producir una viscosidad cinemática entre 0,15 y 0,19 Pa-s (150 y 190 cS).
4. En bandejas taradas, pesar las cantidades de cada porción de agregados, previamente calculadas de acuerdo con el diseño de mezcla propuesto, para la fabricación de una probeta. La suma de los pesos acumulados de los agregados debe de ser igual a 1 200 g.
5. Calentar los agregados hasta llegar a una temperatura aproximada de 110 °C. Con la ayuda de un recipiente de mezclado y una espátula, mezclar en seco durante un tiempo adecuado que permita obtener una buena combinación de los agregados, sin que se presente una pérdida de temperatura en la mezcla.
6. Verter la cantidad requerida de cemento asfáltico en la mezcla de agregados.
7. Mezclar los agregados con el cemento asfáltico lo más rápidamente posible hasta obtener una mezcla completa y homogénea. Esta mezcla se debe realizar en una placa de calentamiento hasta que alcance una temperatura de 140 °C.
8. Simultáneamente, con la preparación de la mezcla, el conjunto de molde, collar y placa de base, se calientan en un baño de agua a temperatura de 60 °C.
9. Secar y armar el conjunto de moldeo de las probetas, aplicándole previamente aceite para desencofrar.
10. Verter la mezcla en el molde y apisonar con una espátula 15 veces alrededor del perímetro y 10 sobre el interior. Esto se realiza para lograr un mejor acomodo de las partículas de la mezcla en el molde.
11. Compactar la mezcla aplicando 75 golpes, por medio del martillo de compactación. La temperatura de la mezcla inmediatamente antes de la compactación deberá ser aproximadamente de 140 °C.

Continuación de la tabla VII.

12. Se procede a retirar el collar, se da vuelta al molde y se vuelve a montar este en el pedestal y se aplica el mismo número de golpes a la cara invertida de la probeta.
13. Después de la compactación, se retira el collar y los moldes. Se deja enfriar la muestra al aire dentro del molde. 24 horas después de la compactación se desencofra.

Fuente: elaboración propia.

1.2.3. Preparación de probetas con adición de cal hidratada

A continuación se indica la metodología y el procedimiento para la elaboración de probetas de mezcla asfáltica modificada.

1.2.3.1. Metodología

La norma a utilizar para la elaboración de las probetas de mezcla asfáltica modificada es la siguiente:

- INV E 748: estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall

1.2.3.2. Procedimiento de elaboración de probetas de mezcla modificada

Con las cantidades de los diferentes tamaños de agregado con los que se realizó la mezcla asfáltica tradicional, son los que se toman en cuenta para la

realización de la mezcla asfáltica modificada con cal hidratada, con la diferencia que:

Una parte del relleno mineral es sustituido por cal hidratada, es decir, al peso de agregado que pasa el tamiz núm. 200 que se utilizó en el diseño de mezcla asfáltica tradicional, se le resta el peso de cal hidratada que corresponde al 1,5 % del peso total de la mezcla de agregados. Por lo tanto, el relleno mineral de la mezcla asfáltica modificada, estará constituido tanto de polvo de roca proveniente del agregado pétreo, como también de cal hidratada. Posteriormente se realiza el procedimiento descrito en el numeral 1.2.2.2

1.2.4. Gravedad específica *bulk* de la mezcla asfáltica

A continuación se presenta la metodología y el procedimiento para la determinación de la gravedad específica *bulk* de la mezcla asfáltica compactada.

1.2.4.1. Metodología

Las normas a utilizar son las siguientes:

- INV E 733: gravedad específica *bulk* y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficialmente secos.
- ASTM D 2726: gravedad específica *bulk* y densidad de mezclas bituminosas compactadas no absorbentes, por sus siglas en inglés, *bulk specific gravity and density of non-absorptive compacted bituminous mixtures*.

- AASHTO T 166: gravedad específica *bulk* de mezclas bituminosas compactadas de superficie seco saturadas, por sus siglas en inglés, *specific gravity of compacted bituminous mixtures using saturated surface-dry specimens*.

El equipo a utilizar es el siguiente:

- Balanza con capacidad adecuada y sensibilidad suficiente para que las gravedades se puedan calcular al menos con cuatro cifras significativas. Deberá estar provista de un dispositivo de suspensión adecuado, que permita pesar el espécimen dentro del agua suspendido bajo el centro del platillo de la balanza.
- Baño con agua para la inmersión del espécimen. Este deberá estar provisto de un rebosadero para mantener el agua a nivel constante.

Figura 5. **Balanza provista de dispositivo de suspensión**



Fuente: Sección de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

1.2.4.2. Procedimiento para determinar la gravedad específica *bulk*

En la tabla VIII se muestra el procedimiento para determinar la gravedad específica *bulk* de mezcla compactada.

Tabla VIII. **Procedimiento para determinar la gravedad específica *bulk***

1. Determinar la masa del espécimen seco, pesándolo después de que haya permanecido al menos durante 1 hora a temperatura ambiente.
2. Sumergir la muestra en un baño de agua a temperatura ambiente durante 5 minutos.
3. Sacar y secar superficialmente la muestra para posteriormente pesarla y obtener el peso saturado.
4. Sumergir la muestra en un baño de agua a temperatura ambiente, se pesa estando suspendida en el agua.
5. Se procede a calcular la gravedad específica de la muestra utilizando la siguiente ecuación: $G_{mb} = \frac{A}{B - C}$ Donde: G _{mb} = gravedad específica <i>bulk</i> A= masa del espécimen (g) B= masa del espécimen saturado con superficie seca (g) C= masa del espécimen sumergido en agua (g)

Fuente: elaboración propia.

1.2.5. Gravedad específica bruta de los agregados

A continuación se presenta la metodología y el procedimiento para determinar la gravedad específica bruta de la combinación de agregados.

1.2.5.1. Metodología

La norma a utilizar es la siguiente:

- ASTM D 1559: método de ensayo de resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas utilizando el aparato Marshall, por sus siglas en inglés, *test method for resistance of plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus.*

1.2.5.2. Procedimiento para determinar la gravedad específica bruta de los agregados.

En la tabla IX se muestra el procedimiento para determinar la gravedad específica bruta de la combinación de agregados.

Tabla IX. **Procedimiento para determinar la gravedad específica bruta de los agregados**

1. Determinar el porcentaje en masa de cada agregado en la mezcla.
2. Calcular la gravedad específica bruta de cada uno de los agregados.

Continuación de la tabla IX.

3. Calcular la gravedad específica bruta para la combinación de agregados, utilizando la siguiente expresión:

$$G_{sb} = \frac{P_{grueso} + P_{fino} + P_{cal}}{\frac{P_{grueso}}{G_{grueso}} + \frac{P_{fino}}{G_{fino}} + \frac{P_{cal}}{G_{cal}}}$$

Donde:

G_{sb} = gravedad específica bruta de los agregados
 P_{grueso} , P_{fino} , P_{cal} = porcentaje en masa del agregado en la mezcla
 G_{grueso} , G_{fino} , G_{cal} = gravedad específica bruta del agregado

Fuente: elaboración propia.

1.2.6. Gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica

A continuación se presenta la metodología y el procedimiento para determinar la gravedad específica teórica máxima.

1.2.6.1. Metodología

Las normas a utilizar son las siguientes:

- INV E 735: gravedad específica máxima de mezclas asfálticas para pavimentos.
- ASTM D 2041: gravedad específica máxima teórica y densidad de las mezclas bituminosas de pavimento, por sus siglas en inglés, *theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures*.

- AASHTO T 209: gravedad específica máxima teórica y densidad de las mezclas bituminosas para pavimento, por sus siglas en inglés, *theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures*.

El equipo a utilizar es el siguiente:

- Picnómetro de vacíos de metal o plástico con un diámetro de 180 a 260 mm y una altura no menor de 160 mm. Este debe estar equipado con una tapa transparente, asegurada con un empaque de caucho y con una conexión para la aplicación del vacío.
- Balanza con capacidad adecuada y sensibilidad suficiente, para que las gravedades específicas de las muestras se puedan calcular al menos con cuatro cifras significativas.
- Bomba de vacío capaz de evacuar el aire del recipiente de vacío hasta una presión residual de 4 kPa (30 mm Hg) o menos.
- Trampa de humedad: dispositivo utilizado para reducir la cantidad de vapor de agua que puede entrar en la bomba, colocado entre la bomba de vacío y el picnómetro.
- Manómetro de presión residual: para confirmar que se está aplicando la presión al recipiente, debe ser capaz de medir una presión residual de 4 kPa (30 mm Hg) o menos.
- Válvula de purga: para facilitar el ajuste del vacío que está siendo aplicado al recipiente y la liberación lenta de la presión de vacío.
- Dispositivo de agitación mecánica, que sea capaz de aplicar una agitación suave pero consistente a la muestra.

Figura 6. **Bomba de vacío**



Fuente: Sección de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 7. **Picnómetro para vacío y dispositivo de agitación**



Fuente: Sección de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 8. **Dispositivo para atrapar el vapor de agua**



Fuente: Sección de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 9. **Manómetro de presión residual**



Fuente: Sección de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

1.2.6.2. Procedimiento para determinar la gravedad específica teórica máxima

En la tabla X se muestra el procedimiento para determinar la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica suelta.

Tabla X. **Procedimiento para determinar la gravedad específica teórica máxima**

<p>1. Una vez que la muestra está seca y se encuentre tibia, desintegrar con las manos logrando separar sus partículas, teniendo cuidado de no fracturarlas. Las partículas de la porción del agregado fino no deben ser mayores de 6 mm.</p>
<p>2. Verter la muestra directamente en el picnómetro previamente tarado. Se pesa el recipiente con la muestra y se designa la masa neta (únicamente la masa de la muestra).</p>
<p>3. Agregar agua a temperatura ambiente, suficiente para cubrir la muestra por completo. Se recomienda que el espejo de agua esté a una altura de por lo menos 1" por encima de la mezcla.</p>
<p>4. Colocar el picnómetro con la muestra y agua sobre el dispositivo de agitación mecánica y asegurarlo a la superficie de este. Activar la bomba de vacío, poner en marcha la agitación e inmediatamente por medio de la válvula de presión residual, se busca que la presión de vacío se encuentre dentro de un rango de 25 a 30 mm Hg. La presión de vacío se deberá alcanzar en un tiempo no mayor a 1 minuto, y una vez alcanzado, se continuará el vacío y la agitación durante 15 minutos.</p>
<p>5. Una vez transcuridos los 15 minutos, liberar gradualmente la presión de vacío usando la válvula de purga</p>
<p>6. Llenar lentamente el picnómetro con agua, teniendo el cuidado de no introducir aire dentro de la muestra. Secar cualquier humedad presente en el exterior del matraz y de la placa de vidrio. Se determina la masa del picnómetro mas la placa, más la muestra, más agua.</p>
<p>7. Calcular la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica por medio de la siguiente expresión:</p> $G_{mm} = \frac{A}{A + D - E}$

Continuación de la tabla X.

<p>Donde:</p> <p>Gmm= gravedad específica teórica máxima A= masa de la muestra seca (g) D= masa del picnómetro lleno de agua (g) E= masa del picnómetro con la muestra y lleno de agua (g)</p>
--

Fuente: elaboración propia.

1.2.7. Gravedad específica efectiva de los agregados

A continuación se presenta la metodología y el procedimiento para determinar la gravedad específica efectiva de los agregados.

1.2.7.1. Metodología

La norma a utilizar es la siguiente:

- ASTM D 1559: método de ensayo de resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas utilizando el aparato Marshall, por sus siglas en inglés, *test method for resistance of plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus*.

1.2.7.2. Procedimiento para determinar la gravedad específica efectiva

En la tabla XI se muestra el procedimiento para determinar la gravedad específica efectiva de los agregados.

Tabla XI. **Procedimiento para determinar la gravedad específica efectiva de los agregados**

1. Calcular la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica.
2. Determinar el porcentaje de ligante asfáltico en relación al total de la masa de la mezcla.
3. Determinar la gravedad específica del ligante asfáltico, utilizando el procedimiento siguiente: <ul style="list-style-type: none">a. Pesar un picnómetro de vidrio de 22 a 26 mm de diámetro que contenga un tapón con orificio en su centro (picnómetro = A)b. Llenar parcialmente con agua destilada un vaso de precipitado de 600 ml de capacidad.c. Sumergir el vaso de precipitado en un baño de agua a temperatura de 25 °C a una profundidad de tal manera que la parte superior del vaso quede por encima del espejo de agua del baño.d. Llenar el picnómetro con agua destilada y colocarlo dentro del vaso de precipitado, luego colocarlos en el baño de agua de modo que el picnómetro quede totalmente sumergido durante un tiempo no menor de 30 minutos.e. Sacar el picnómetro, secarlo y pesarlo (picnómetro + agua = B).f. Calentar el cemento asfáltico hasta lograr que sea suficientemente fluido para ser vertido.g. Verter una cantidad del ligante en el picnómetro vacío previamente tarado. Esta cantidad debe cubrir aproximadamente 3/4 partes de la capacidad del picnómetro.h. Dejar que la muestra se enfríe en el picnómetro a temperatura ambiente en un periodo no menor de 30 minutos y luego pesarlo (picnómetro + ligante = C)

Continuación de la tabla XI.

- i. Terminar de llenar el picnómetro en su totalidad con el agua destilada del vaso de precipitado. Sumergirlo dentro del vaso de precipitado y colocarlos dentro del baño de agua a una temperatura de 25 °C durante un periodo no menor de 30 minutos
- j. Sacar, secar y pesar el picnómetro (picnómetro + ligante + agua = D)
- k. Calcular la gravedad específica del cemento asfáltico por medio de la siguiente expresión:

$$G_{ac} = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)}$$

La gravedad específica del cemento asfáltico utilizado en el presente trabajo es la siguiente:

$$G_{ac} = \frac{58,13 - 37,84}{(62,74 - 37,84) - (63,73 - 58,13)} = 1,05$$

4. Calcular la gravedad específica efectiva de los agregados, por medio de la siguiente expresión:

$$G_{se} = \frac{100 - P_{ac}}{\frac{100}{G_{mm}} - \frac{P_{ac}}{G_{ac}}}$$

Donde:

G_{se} = gravedad específica efectiva de los agregados

G_{mm} = gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica

P_{ac} = porcentaje de ligante asfáltico

G_{ac} = gravedad específica del ligante asfáltico

Fuente: elaboración propia.

1.2.8. Peso unitario de la mezcla asfáltica

A continuación se presenta la metodología y el procedimiento para determinar el peso unitario de la mezcla asfáltica compactada.

1.2.8.1. Metodología

La norma a utilizar es la siguiente:

- ASTM D 1559: método de ensayo de resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas utilizando el aparato Marshall, por sus siglas en inglés, *test method for resistance of plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus.*

1.2.8.2. Procedimiento para determinar el peso unitario de la mezcla.

En la tabla XII se muestra el procedimiento para determinar el peso unitario de la mezcla asfáltica compactada.

Tabla XII. **Procedimiento para determinar el peso unitario de la mezcla**

1. Determinar la gravedad específica <i>bulk</i> de la mezcla asfáltica.
2. Calcular el peso unitario, multiplicando la gravedad específica <i>bulk</i> de la mezcla asfáltica por la densidad del agua (1 g/cm ³)

Fuente: elaboración propia.

1.2.9. Porcentaje de vacíos-densidad de la mezcla asfáltica

A continuación se presenta la metodología y el procedimiento para determinar el porcentaje de vacíos llenos de aire en la mezcla compactada.

1.2.9.1. Metodología

Las normas a utilizar son las siguientes:

- INV E 736: porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas.
- ASTM D 3203: método estándar de prueba para porcentaje de vacíos en mezclas bituminosas compactadas densas y abiertas para pavimento, por sus siglas en inglés, *standard test method for percent air voids in compacted dense and open bituminous paving mixtures*.
- AASHTO T269: porcentaje de vacíos con aire en mezclas compactadas de pavimento bituminoso denso y abierto, por sus siglas en inglés, *percent air voids in compacted dense and open bituminous paving mixtures*.

1.2.9.2. Procedimiento para determinar el porcentaje de vacíos en la mezcla.

En la tabla XIII se muestra el procedimiento para determinar el porcentaje de vacíos en la mezcla.

Tabla XIII. **Procedimiento para determinar el porcentaje de vacíos**

1. Determinar la gravedad específica <i>bulk</i> de la mezcla asfáltica.
2. Determinar la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica.
3. Calcular el porcentaje de vacíos con aire en la mezcla asfáltica, por medio de la siguiente expresión: $VA = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \times 100$ Donde: VA= porcentaje de vacíos G _{mm} = gravedad específica teórica máxima G _{mb} = gravedad específica <i>bulk</i>

Fuente: elaboración propia.

1.2.10. **Porcentaje de vacíos en el agregado mineral**

A continuación se presenta la metodología y el procedimiento para determinar el porcentaje de vacíos presente en el agregado mineral.

1.2.10.1. **Metodología**

La norma a utilizar es la siguiente:

- ASTM D 1559: método de ensayo de resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas utilizando el aparato Marshall, por sus siglas en inglés, *test method for resistance of plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus*.

1.2.10.2. Procedimiento para determinar el porcentaje de vacíos en el agregado mineral

En la tabla XIV se muestra el procedimiento para determinar el porcentaje de vacíos en el agregado mineral.

Tabla XIV. **Procedimiento para determinar el porcentaje de vacíos en el agregado mineral**

1. Calcular la gravedad específica <i>bulk</i> de la mezcla asfáltica.
2. Determinar el porcentaje de agregado en la mezcla.
3. Calcular la gravedad específica bruta de la combinación de agregados.
4. Calcular el porcentaje de vacíos en el agregado mineral por medio de la siguiente expresión: $VAM = 100 - \frac{G_{mb} P_s}{G_{sb}}$ Donde: VAM= porcentaje de vacíos en el agregado mineral G_{mb} = gravedad específica <i>bulk</i> de la mezcla asfáltica P_s = porcentaje de agregados en la mezcla asfáltica G_{sb} = gravedad específica bruta de los agregados

Fuente: elaboración propia.

1.2.11. Porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico

A continuación se presenta la metodología y el procedimiento para determinar el porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico.

1.2.11.1. Metodología

La norma a utilizar es la siguiente:

- ASTM D 1559: método de ensayo de resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas utilizando el aparato Marshall, por sus siglas en inglés, *test method for resistance of plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus*.

1.2.11.2. Procedimiento para determinar el porcentaje de vacíos llenados con asfalto

En la tabla XV se muestra el procedimiento para determinar el porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico.

Tabla XV. **Procedimiento para determinar el porcentaje de vacíos llenados con asfalto**

1. Calcular el porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica.
2. Calcular el porcentaje de vacíos en el agregado mineral.
3. Calcular el porcentaje de vacíos llenados con ligante asfáltico por medio de la siguiente expresión: $VFA = 100 \times \frac{VAM - VA}{VAM}$ Donde: VFA= porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico VAM= porcentaje de vacíos en el agregado mineral VA= porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica

Fuente: elaboración propia.

1.2.12. Relación relleno mineral/asfalto

A continuación se presenta la metodología y el procedimiento para determinar la relación del relleno mineral con el cemento asfáltico en la mezcla.

1.2.12.1. Metodología

La norma a utilizar es la siguiente:

- ASTM D 1559: método de ensayo de resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas utilizando el aparato Marshall, por sus siglas en inglés, *test method for resistance of plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus*.

1.2.12.2. Procedimiento para determinar la relación relleno mineral/asfalto

En la tabla XVI se muestra el procedimiento para determinar la relación relleno mineral/asfalto.

Tabla XVI. **Procedimiento para determinar la relación relleno mineral/asfalto**

1. Determinar la gravedad específica efectiva de los agregados.
2. Determinar la gravedad específica bruta de los agregados.
3. Calcular el porcentaje de ligante asfáltico absorbido por medio de la siguiente expresión:

Continuación de la tabla XVI.

$$P_{ba} = \frac{100G_{ac}(G_{se} - G_{sb})}{G_{sb}G_{se}}$$

Donde:

P_{ba} = porcentaje de ligante asfáltico absorbido
 G_{se} = gravedad específica efectiva de los agregados
 G_{ac} = gravedad específica del cemento asfáltico
 G_{sb} = gravedad específica bruta de los agregados

4. Determinar el porcentaje de agregado en la mezcla asfáltica.

5. Calcular el porcentaje de cemento asfáltico efectivo por medio de la siguiente expresión:

$$P_{be} = P_{ac} - \frac{P_{ba}P_s}{100}$$

Donde:

P_{be} = porcentaje de ligante asfáltico efectivo
 P_{ac} = porcentaje de ligante asfáltico en la mezcla asfáltica
 P_{ba} = porcentaje de ligante asfáltico absorbido
 P_s = porcentaje de agregado en la mezcla asfáltica

6. Calcular la relación del relleno mineral/cemento asfáltico utilizando la siguiente expresión:

$$F/A = \frac{\% \text{ que pasa tamiz núm. 200}}{P_{be}}$$

Donde:

F/A = relación relleno mineral/asfalto
 P_{be} = porcentaje de ligante asfáltico efectivo

Fuente: elaboración propia.

1.2.13. Prueba de estabilidad-flujo Marshall

A continuación se presenta la metodología y el procedimiento para determinar la estabilidad y el flujo Marshall.

1.2.13.1. Metodología

Las normas a utilizar son las siguientes:

- INV E 748: estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall.
- ASTM D 1559: método de ensayo de resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas utilizando el aparato Marshall, por sus siglas en inglés, *test method for resistance of plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus*.
- AASHTO T 245: resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas utilizando el aparato Marshall, por sus siglas en inglés, *resistance to plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus*.

El equipo a utilizar es el siguiente:

- Mordazas de hierro fundido: la mordaza inferior va montada sobre una base plana, provista de dos varillas perpendiculares a ella que sirven de guía para ensamblarla con la mordaza superior.
- Máquina de compresión para la rotura de las probetas. Se emplea una prensa mecánica o hidráulica capaz de producir una velocidad uniforme de desplazamiento vertical de 50 ± 5 mm/min.

- Anillo dinamométrico: para medir la resistencia de la probeta. Irá acoplado a la prensa y debe ser de 20 kN de capacidad nominal con una sensibilidad mínima de 50 N.
- Deformímetro de lectura final fija: con divisiones de 0,25 mm o de mayor precisión. En el momento del ensayo, el medidor deberá estar apoyado firmemente sobre la mordaza inferior.
- Baño de agua de profundidad suficiente para mantener una lámina de agua mínima de 30 mm sobre la superficie superior de las probetas compactadas. Debe tener un control termostático que le permita mantener la temperatura en cualquier punto del tanque.

Figura 10. **Anillo dinamométrico y deformímetro de lectura fija**



Fuente: Sección de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 11. Recipiente con control termostático



Fuente: Sección de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

1.2.13.2. Procedimiento para determinar la estabilidad y el flujo Marshall

En la tabla XVII se muestra el procedimiento para determinar la estabilidad y el flujo Marshall.

Tabla XVII. Procedimiento para determinar la estabilidad y flujo Marshall

El ensayo se debe realizar dentro de las 24 horas siguientes a la compactación de las probetas.
1. Colocar las probetas en el baño de agua durante 45 minutos manteniendo una temperatura constante de 60 °C.
2. Antes de colocar las probetas, limpiar perfectamente las barras guías y las superficies interiores de las mordazas de ensayo.

Continuación de la tabla XVII.

<p>3. Retirar una probeta del baño de agua y secar cualquier exceso de agua con una toalla. Se coloca centrada en la mordaza inferior, se monta la mordaza superior con el medidor de deformación y el conjunto se sitúa centrado en la prensa. Colocar el medidor de flujo en posición, se ajusta a cero, y se mantiene su vástago firmemente contra la mordaza superior, mientras se aplica la carga de ensayo.</p>
<p>4. A continuación, aplicar la carga sobre la probeta con la prensa a una tasa de deformación constante de 50 ± 5 mm/min hasta que ocurra la falla, es decir, cuando se advierte que se alcanza la máxima carga y luego comienza decrecer. El procedimiento completo, desde la extracción de la probeta del baño de agua hasta su falla, no deberá exceder a más de 30 segundos.</p>
<p>5. Anotar el valor de carga leído en el anillo dinamométrico y el valor de la deformación leído en el deformímetro.</p>
<p>6. Se calcula el equivalente de resistencia en libras-fuerza de la lectura obtenida en el anillo dinamométrico, utilizando los valores de la tabla Humboldt Mfg. Co. corrección estabilidad Marshall (ver anexo 1).</p>
<p>7. Al valor de resistencia se le aplica un factor de corrección, el cual está en función del volumen de la probeta ensayada, para esto se utiliza la tabla de factores de corrección de estabilidad medida (ver anexo 2).</p>

Fuente: elaboración propia.

1.2.14. Contenido de humedad presente en la mezcla

A continuación se presenta la metodología y el procedimiento para determinar el contenido de humedad presente en la mezcla compactada.

1.2.14.1. Metodología

La norma a utilizar es la siguiente:

- INV E 733: gravedad específica *bulk* y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficialmente secos.

1.2.14.2. Procedimiento para determinar el contenido de humedad

En la tabla XVIII se muestra el procedimiento para determinar el contenido de humedad en la mezcla.

Tabla XVIII. **Procedimiento para determinar el contenido de humedad en la mezcla**

1. Con los pesos utilizados para la obtención de la gravedad específica *bulk* de la mezcla asfáltica, calcular el porcentaje de agua contenida en la muestra después de haber sido sumergida en agua, mediante la siguiente expresión:

$$\% H = \frac{B - A}{B - C} \times 100$$

Donde:

- % H= porcentaje de humedad contenida en el espécimen
- A= masa seca del espécimen (g)
- B= masa del espécimen saturado con superficie seca (g)
- C= masa del espécimen sumergido (g)

Fuente: elaboración propia.

Nota: otro método que se utiliza para determinar el porcentaje de humedad que puede estar presente en la mezcla compactada, está relacionado con el porcentaje de vacíos calculado en el numeral 1.2.9. Es decir, que a mayor porcentaje de vacíos existirá una mayor posibilidad de presencia de contenido de agua en la mezcla y viceversa.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1. Resultados de los ensayos

En esta sección se presentan los datos y los respectivos cálculos de cada ensayo descrito anteriormente.

2.1.1. Gravedad específica *bulk*

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo para demostrar cómo se determinaron los resultados del ensayo de gravedad específica *bulk*.

Ejemplo de cálculo:

Datos:

A: 1 223,91 g

B: 1 239,76 g

C: 708,91 g

$$G_{mb} = \frac{1\ 223,91}{1\ 239,76 - 708,91} = 2,30$$

Nota: los valores que representan la G_{mb} para cada contenido de asfalto, son el promedio de las dos gravedades más representativas entre las tres probetas ensayadas.

2.1.1.1. Resultados

Los resultados del ensayo son los siguientes:

Tabla XIX. **Resultados de gravedad específica *bulk* (mezcla tradicional)**

Porcentaje de cemento asfáltico	Probeta	A (g)	B (g)	C (g)	G _{mb}	G _{mb} promedio
4	1	1 240,51	1 250,55	716,20	2,32	2,31
	2	1 234,18	1 242,06	716,90	2,35	
	3	1 223,91	1 239,76	708,91	2,30	
4,5	1	1 244,35	1 252,75	719,85	2,34	2,34
	2	1 247,43	1 254,80	722,66	2,34	
	3	1 242,78	1 252,47	718,60	2,32	
5	1	1 241,00	1 246,92	720,16	2,35	2,35
	2	1 248,05	1 253,88	721,76	2,34	
	3	1 241,52	1 250,10	717,25	2,32	
5,5	1	1 247,82	1 249,96	725,93	2,38	2,38
	2	1 249,08	1 251,42	725,98	2,37	
	3	1 243,77	1 246,06	727,19	2,39	
6	1	1 243,77	1 246,06	727,19	2,39	2,39
	2	1 245,06	1 248,15	728,89	2,39	
	3	1 242,83	1 245,90	723,38	2,37	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Resultados de gravedad específica *bulk* (mezcla modificada)**

Porcentaje de cemento asfáltico	Probeta	A (g)	B (g)	C (g)	G_{mb}	G_{mb} promedio
4	1	1 239,22	1 252,72	711,20	2,28	2,29
	2	1 234,95	1 246,25	717,07	2,33	
	3	1 241,16	1 255,06	717,57	2,30	
4,5	1	1 244,17	1 249,23	720,50	2,35	2,32
	2	1 247,27	1 252,77	714,23	2,31	
	3	1 243,32	1 249,91	710,88	2,30	
5	1	1 182,38	1 185,44	686,35	2,36	2,36
	2	1 238,36	1 261,70	718,49	2,28	
	3	1 250,29	1 253,89	722,66	2,35	
5,5	1	1 248,73	1 251,33	724,72	2,37	2,37
	2	1 251,91	1 253,62	731,36	2,39	
	3	1 246,32	1 249,12	721,81	2,36	
6	1	1 246,00	1 247,18	732,25	2,41	2,38
	2	1 234,12	1 237,41	715,37	2,36	
	3	1 245,32	1 249,16	728,52	2,39	

Fuente: elaboración propia.

2.1.2. Gravedad específica bruta de los agregados

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo para demostrar cómo se determinaron los resultados del ensayo de gravedad específica bruta de la combinación de agregados.

Ejemplo de cálculo:

Datos:

P_{grueso} : 43 %

P_{fino} : 57 %

G_{grueso} : 2,62

G_{fino} : 2,59

$$G_{\text{sb}} = \frac{43 + 57}{\frac{43}{2,62} + \frac{57}{2,59}} = 2,60$$

2.1.2.1. Resultados

Los resultados del ensayo son los siguientes:

Tabla XXI. **Resultados de gravedad específica bruta de los agregados**

Tipo de mezcla	P_{grueso} (%)	P_{fino} (%)	P_{cal} (%)	G_{grueso}	G_{fino}	G_{cal}	G_{sb}
Tradicional	43	57	-	2,62	2,59	-	2,60
Modificada	43	55,5	1,5	2,62	2,59	2,28	2,60

Fuente: elaboración propia.

2.1.3. Gravedad específica teórica máxima

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo para demostrar cómo se determinaron los resultados del ensayo de gravedad específica teórica máxima de la mezcla suelta.

Ejemplo de cálculo:

Datos:

A: 1 217,08 gr

D: 7 374,50 gr

E: 8 115,30 gr

$$G_{mm} = \frac{1\ 217,08}{1\ 217,08 + 7\ 374,50 - 8\ 115,30} = 2,55$$

2.1.3.1. Resultados

Los resultados del ensayo son los siguientes:

Tabla XXII. Resultados de gravedad específica teórica máxima

Porcentaje de cemento asfáltico	Tipo de mezcla	A (g)	D (g)	E (g)	G _{mm}
4	Mezcla tradicional	1 217,08	7 374,50	8 115,30	2,55
	Mezcla modificada	1 235,60	7 384,10	8 127,30	2,50

Continuación de la tabla XXII.

4,5	Mezcla tradicional	1 251,21	7 374,50	8 131,80	2,53
	Mezcla modificada	1 208,51	7 384,10	8 108,10	2,49
5	Mezcla tradicional	1 235,81	7 374,50	8 116,90	2,50
	Mezcla modificada	1 180,13	7 384,10	8 088,00	2,47
5,5	Mezcla tradicional	1 242,72	7 374,50	8 123,00	2,51
	Mezcla modificada	1 231,60	7 384,10	8 115,00	2,45
6	Mezcla tradicional	1 211,25	7 374,50	8 102,50	2,50
	Mezcla modificada	1 224,91	7 384,10	8 108,50	2,44

Fuente: elaboración propia.

2.1.4. Gravedad específica efectiva de los agregados

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo para demostrar cómo se determinaron los resultados del ensayo de gravedad específica efectiva de los agregados.

Ejemplo de cálculo:

Datos:

P_{ac} : 4 %

G_{mm} : 2,55

G_{ac} : 1,05

$$G_{se} = \frac{100 - 4}{\frac{100}{2,55} - \frac{4}{1,05}} = 2,71$$

2.1.4.1. Resultados

Los resultados del ensayo son los siguientes:

Tabla XXIII. **Resultados de gravedad específica efectiva de los agregados**

Porcentaje de cemento asfáltico	Tipo de mezcla	P _{ca} (%)	G _{mm}	G _{ac}	G _{se}
4	Mezcla tradicional	4	2,55	1,05	2,71
	Mezcla modificada	4	2,50	1,05	2,65
4,5	Mezcla tradicional	4,5	2,53	1,05	2,71
	Mezcla modificada	4,5	2,49	1,05	2,66
5	Mezcla tradicional	5	2,50	1,05	2,70
	Mezcla modificada	5	2,47	1,05	2,66
5,5	Mezcla tradicional	5,5	2,51	1,05	2,73
	Mezcla modificada	5,5	2,45	1,05	2,66
6	Mezcla tradicional	6	2,50	1,05	2,74
	Mezcla modificada	6	2,44	1,05	2,67

Fuente: elaboración propia.

2.1.5. Peso unitario de la mezcla asfáltica

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo para demostrar cómo se determinaron los resultados del ensayo de peso unitario de la mezcla asfáltica compactada.

Ejemplo de cálculo:

Datos:

$$G_{mb}: 2,31$$

$$\rho: 1 \text{ g/cm}^3$$

$$PU = 2,31(1 \text{ g/cm}^3) = 2,31 \text{ g/cm}^3$$

2.1.5.1. Resultados

Los resultados del ensayo son los siguientes:

Tabla XXIV. **Resultados de peso unitario de la mezcla asfáltica**

Porcentaje de cemento asfáltico	Tipo de mezcla	G_{mb}	ρ (g/cm ³)	PU (g/cm ³)
4	Mezcla tradicional	2,31	1	2,31
	Mezcla modificada	2,29	1	2,29
4,5	Mezcla tradicional	2,34	1	2,34
	Mezcla modificada	2,32	1	2,32
5	Mezcla tradicional	2,35	1	2,35
	Mezcla modificada	2,36	1	2,36
5,5	Mezcla tradicional	2,38	1	2,38
	Mezcla modificada	2,37	1	2,37
6	Mezcla tradicional	2,39	1	2,39
	Mezcla modificada	2,38	1	2,38

Fuente: elaboración propia.

2.1.6. Porcentaje de vacíos-densidad

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo para demostrar cómo se determinaron los resultados del ensayo de porcentaje de vacíos-densidad de la mezcla asfáltica.

Ejemplo de cálculo:

Datos:

$$G_{mb} = 2,31$$

$$G_{mm} = 2,55$$

$$V_A = \frac{2,55 - 2,31}{2,55} \times 100 = 9,46 \%$$

2.1.6.1. Resultados

Los resultados del ensayo son los siguientes:

Tabla XXV. Resultados de porcentaje de vacíos-densidad

Porcentaje de cemento asfáltico	Tipo de mezcla	G_{mb}	G_{mm}	VA (%)
4	Mezcla tradicional	2,31	2,55	9,46
	Mezcla modificada	2,29	2,50	8,40
4,5	Mezcla tradicional	2,34	2,53	7,87
	Mezcla modificada	2,32	2,49	6,82

Continuación de la tabla XXV.

5	Mezcla tradicional	2,35	2,50	6,14
	Mezcla modificada	2,36	2,47	4,45
5,5	Mezcla tradicional	2,38	2,51	5,38
	Mezcla modificada	2,37	2,45	3,26
6	Mezcla tradicional	2,39	2,50	4,35
	Mezcla modificada	2,38	2,44	2,45

Fuente: elaboración propia.

2.1.7. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo para demostrar cómo se determinaron los resultados del ensayo de porcentaje de vacíos presente en el agregado mineral.

Ejemplo de cálculo:

Datos:

G_{mb} : 2,31

P_s : 96 %

G_{sb} : 2,60

$$VAM = 100 - \frac{2,31 * 96}{2,60} = 14,80 \%$$

2.1.7.1. Resultados

Los resultados del ensayo son los siguientes:

Tabla XXVI. **Resultados de porcentaje de vacíos en el agregado mineral**

Porcentaje de cemento asfáltico	Tipo de mezcla	G_{mb}	P_s (%)	G_{sb}	VAM (%)
4	Mezcla tradicional	2,31	96	2,60	14,80
	Mezcla modificada	2,29	96	2,60	15,36
4,5	Mezcla tradicional	2,34	95,5	2,60	14,14
	Mezcla modificada	2,32	95,5	2,60	14,70
5	Mezcla tradicional	2,35	95	2,60	14,23
	Mezcla modificada	2,36	95	2,60	13,69
5,5	Mezcla tradicional	2,38	94,5	2,60	13,59
	Mezcla modificada	2,37	94,5	2,60	13,78
6	Mezcla tradicional	2,39	94	2,60	13,69
	Mezcla modificada	2,38	94	2,60	13,87

Fuente: elaboración propia.

2.1.8. Porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo para demostrar cómo se determinaron los resultados del ensayo de porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico.

Ejemplo de cálculo:

Datos:

VAM: 14,80 %

VA: 9,46 %

$$VFA = 100 \times \frac{14,80 - 9,46}{14,80} = 36,08 \%$$

2.1.8.1. Resultados

Los resultados del ensayo son los siguientes:

Tabla XXVII. Resultados de porcentaje de vacíos llenados con asfalto

Porcentaje de cemento asfáltico	Tipo de mezcla	VAM (%)	VA (%)	VFA (%)
4	Mezcla tradicional	14,80	9,46	36,08
	Mezcla modificada	15,36	8,40	45,33
4,5	Mezcla tradicional	14,14	7,87	44,35
	Mezcla modificada	14,70	6,82	53,61
5	Mezcla tradicional	14,23	6,14	56,84
	Mezcla modificada	13,69	4,45	67,48
5,5	Mezcla tradicional	13,59	5,38	60,41
	Mezcla modificada	13,78	3,26	76,34
6	Mezcla tradicional	13,69	4,35	68,22
	Mezcla modificada	13,87	2,45	82,34

Fuente: elaboración propia.

2.1.9. Relación relleno mineral/asfalto

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo para demostrar cómo se determinaron los resultados del ensayo de relación relleno mineral/asfalto.

Ejemplo de cálculo:

Datos:

Porcentaje que pasa tamiz núm. 200: 4 %

P_{be}: 2,45 %

$$\frac{F}{A} = \frac{4}{2,45} = 1,63$$

2.1.9.1. Resultados

Los resultados del ensayo son los siguientes:

Tabla XXVIII. **Resultados de relación relleno mineral/asfalto (mezcla tradicional)**

Porcentaje de cemento asfáltico	G _{ac}	G _{se}	G _{sb}	P _s	P _{ac}	P _{ba} (%)	P _{be} (%)	Porcentaje que pasa tamiz núm. 200	F/A
4	1,05	2,71	2,60	96	4	1,62	2,45	4	1,63
4,5	1,05	2,71	2,60	95,5	4,5	1,60	2,98	4	1,34
5	1,05	2,70	2,60	95	5	1,39	3,68	4	1,08

Continuación de la tabla XXVIII.

5,5	1,05	2,73	2,60	94,5	5,5	1,89	3,71	4	1,07
6	1,05	2,74	2,60	94	6	2,04	4,08	4	0,98

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Resultados de relación relleno mineral/asfalto (mezcla modificada)**

Porcentaje de cemento asfáltico	G _{ac}	G _{se}	G _{sb}	P _s	P _{ac}	P _{ba} (%)	P _{be} (%)	Porcentaje que pasa tamiz núm. 200	F/A
4	1,05	2,65	2,60	96	4	0,84	3,19	4	1,25
4,5	1,05	2,66	2,60	95,5	4,5	0,98	3,56	4	1,12
5	1,05	2,66	2,60	95	5	0,94	4,11	4	0,97
5,5	1,05	2,66	2,60	94,5	5,5	0,89	4,66	4	0,85
6	1,05	2,67	2,60	94	6	1,03	5,03	4	0,79

Fuente: elaboración propia.

2.1.10. Prueba de estabilidad-flujo Marshall

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo para demostrar cómo se determinaron los resultados del ensayo de estabilidad Marshall.

Ejemplo de cálculo:

Datos:

Lectura anillo dinamométrico: 217 deflt

Diámetro promedio de la probeta: 10,16 cm

Altura promedio de la probeta: 6,83 cm

Se utiliza la tabla de corrección de estabilidad Marshall (ver apéndice 1), para obtener el valor de estabilidad en libras-fuerza que corresponda a las 217 lb leídas en el anillo dinamométrico:

$$217 \text{ deflt} = 2\,059,43 \text{ lbf}$$

Se calcula el volumen de la probeta para aplicar el factor de corrección al valor de estabilidad (ver apéndice 2):

$$\text{volumen} = \frac{\pi}{4} (10,16)^2 (6,83) = 553,73 \text{ cm}^3$$

Para un volumen de $553,73 \text{ cm}^3$ equivale un factor de corrección de 0,89. Por lo tanto el valor de estabilidad real sería:

$$\text{Estabilidad} = (2\,059,43)(0,89) = 1\,832,89 \text{ lbf}$$

2.1.10.1. Resultados

Los resultados del ensayo son los siguientes:

Tabla XXX. **Resultados de estabilidad-flujo Marshall (mezcla tradicional)**

Porcentaje de cemento asfáltico	Probeta	Lectura anillo dinámico (deflt)	Estabilidad (lbf)	Factor de corrección	Estabilidad corregida (lbf)	Flujo (0,01")
4	1	217	2 059,43	0,89	1 832,89	11
	2	190	1 803,77	0,93	1 677,50	10
4,5	1	210	1 993,39	0,89	1 774,11	11
	2	200	1 899,03	0,89	1 690,13	10
5	1	175	1 662,26	0,89	1 479,41	10
	2	182	1 728,30	0,93	1 607,31	11
5,5	1	195	1 850,96	0,83	1 536,29	14
	2	211	2 002,83	0,93	1 862,63	8
6	1	180	1 709,43	0,93	1 589,63	15
	2	165	1 567,30	0,93	1 457,58	15

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Resultados de estabilidad-flujo Marshall (mezcla modificada)**

Porcentaje de cemento asfáltico	Probeta	Lectura anillo dinamo-métrico (deflt)	Estabilidad (lbf)	Factor de corrección	Estabilidad corregida (lbf)	Flujo (0,01")
4	1	130	1 235,85	0,89	1 099,97	15
	2	185	1 756,60	0,86	1 510,67	16
4,5	1	195	1 850,96	0,89	1 647,35	17
	2	266	2 521,69	0,81	2 042,56	15
5	1	233	2 210,38	1,00	2 210,38	17
	2	222	2 106,60	0,96	2 022,33	18
5,5	1	218	2 068,86	0,96	1 986,10	18
	2	205	1 946,23	0,93	1 809,99	19
6	1	245	2 323,58	0,96	2 230,63	18
	2	160	2 040,56	0,89	1 816,09	18

Fuente: elaboración propia.

2.1.11. Porcentaje de humedad

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo para demostrar cómo se determinaron los resultados del ensayo de contenido de humedad presente en la mezcla compactada.

Ejemplo de cálculo:

Datos:

A: 1 223,91 gr

B: 1 239,76 gr

C: 708,91 gr

$$\% H = \frac{1\ 239,76 - 1\ 223,91}{1\ 239,76 - 708,91} \times 100 = 2,99$$

2.1.11.1. Resultados

Los resultados del ensayo son los siguientes:

Tabla XXXII. **Resultados de porcentaje de humedad (mezcla tradicional)**

Porcentaje de cemento asfáltico	Probeta	A (g)	B (g)	C (g)	% H	% H promedio
4	1	1 240,51	1 250,55	716,20	2,99	1,69
	2	1 234,18	1 242,06	716,90	1,88	
	3	1 223,91	1 239,76	708,91	1,50	
4,5	1	1 244,35	1 252,75	719,85	1,58	1,48
	2	1 247,43	1 254,80	722,66	1,38	
	3	1 242,78	1 252,47	718,60	1,81	
5	1	1 241,00	1 246,92	720,16	1,12	1,11
	2	1 248,05	1 253,88	721,76	1,10	
	3	1 241,52	1 250,10	717,25	1,61	

Continuación de la tabla XXXII.

5,5	1	1 247,82	1 249,96	725,93	0,41	0,45
	2	1 249,08	1 251,42	725,98	0,45	
	3	1 243,77	1 246,06	727,19	0,44	
6	1	1 243,77	1 246,06	727,19	0,44	0,59
	2	1 245,06	1 248,15	728,89	0,59	
	3	1 242,83	1 245,90	723,38	0,58	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Resultados de porcentaje de humedad (mezcla modificada)**

Porcentaje de cemento asfáltico	Probeta	A (g)	B (g)	C (g)	% H	% H promedio
4	1	1 239,22	1 252,72	711,20	2,49	2,53
	2	1 234,95	1 246,25	717,07	2,13	
	3	1 241,16	1 255,06	717,57	2,58	
4,5	1	1 244,17	1 249,23	720,50	0,95	1,12
	2	1 247,27	1 252,77	714,23	1,02	
	3	1 243,32	1 249,91	710,88	1,22	
5	1	1 182,38	1 185,44	686,35	0,61	0,64
	2	1 238,36	1 261,70	718,49	4,29	
	3	1 250,29	1 253,89	722,66	0,67	

Continuación de la tabla XXXIII.

5,5	1	1 248,73	1 251,33	724,72	0,49	0,40
	2	1 251,91	1 253,62	731,36	0,32	
	3	1 246,32	1 249,12	721,81	0,53	
6	1	1 246,00	1 247,18	732,25	0,22	0,65
	2	1 234,12	1 237,41	715,37	0,63	
	3	1 245,32	1 249,16	728,52	0,68	

Fuente: elaboración propia.

Nota: para todos los contenidos de cementos asfalto se ensayan las 3 probetas, sin embargo, el promedio que representa el valor del ensayo es el obtenido entre las 2 probetas más significativas, es decir, las probetas que tengan mayor similitud entre sus datos numéricos. Únicamente para la obtención de la G_{mm} se ensaya solamente una probeta, la cual debe de ser elegida como la más representativa entre las tres.

2.2. Análisis de resultados

En esta sección se presta la tabulación de los resultados finales y sus respectivas gráficas, para compararlos con los valores de diseño que indican las normas y especificaciones.

2.2.1. Tabulación de resultados

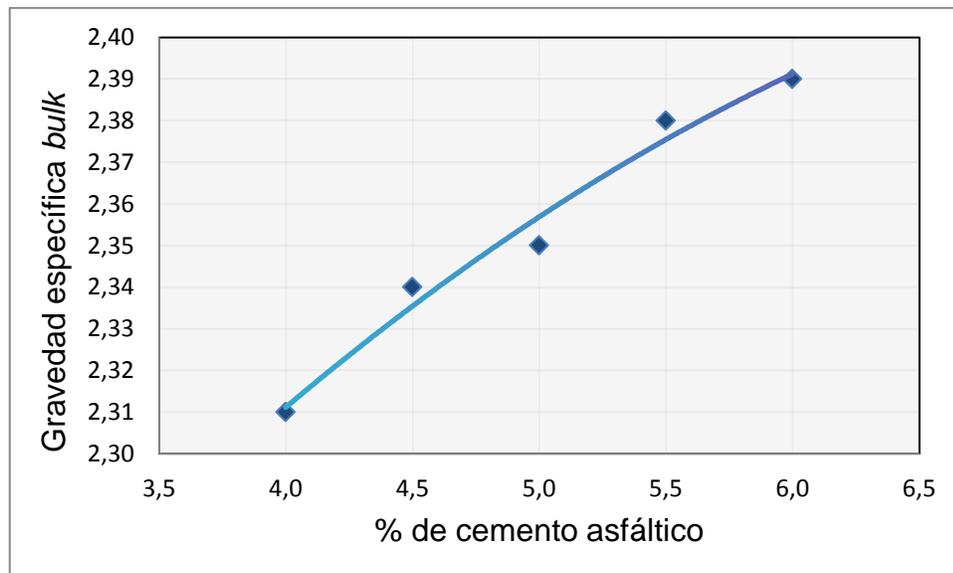
A continuación, en las tablas siguientes se presenta un cuadro resumen de los resultados correspondientes a cada uno de los ensayos realizados.

Tabla XXXIV. Cuadro comparativo de gravedad específica *bulk*

Porcentaje de cemento asfáltico	Mezcla asfáltica tradicional G_{mb}	Mezcla asfáltica con cal hidratada G_{mb}	Variación	
			Absoluta	Relativa (%)
4	2,31	2,29	0,02	0,86
4,5	2,34	2,32	0,02	0,85
5	2,35	2,36	0,01	0,42
5,5	2,38	2,37	0,01	0,42
6	2,39	2,38	0,01	0,41

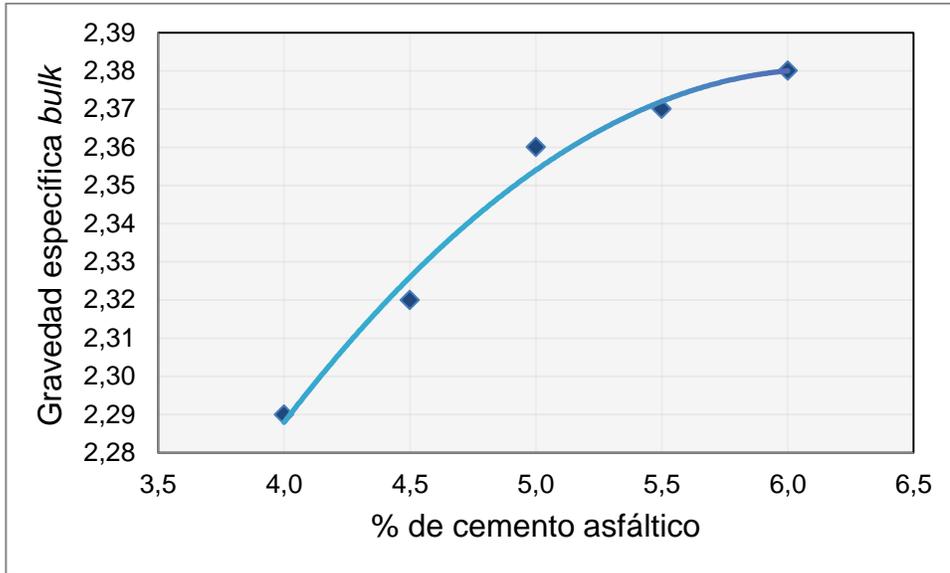
Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Gráfico de gravedad específica *bulk* (mezcla tradicional)



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

Figura 13. **Gráfico de gravedad específica *bulk* (mezcla modificada)**



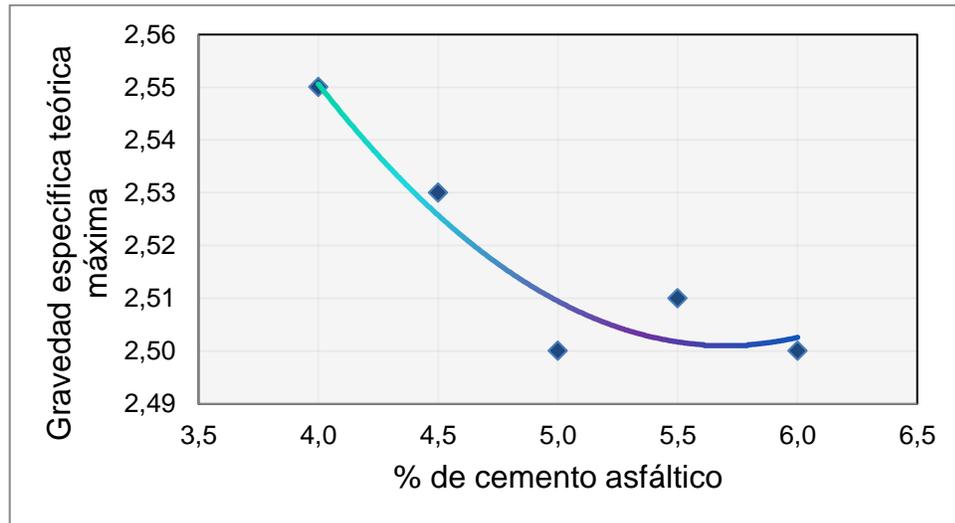
Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

Tabla XXXV. **Cuadro comparativo de gravedad específica teórica máxima**

Porcentaje de cemento asfáltico en la muestra	Mezcla asfáltica tradicional G_{mm}	Mezcla asfáltica con cal hidratada G_{mm}	Variación	
			Absoluta	Relativa (%)
4	2,55	2,50	0,05	1,96
4,5	2,53	2,49	0,04	1,58
5	2,50	2,47	0,03	1,20
5,5	2,51	2,45	0,06	2,39
6	2,50	2,44	0,06	2,40

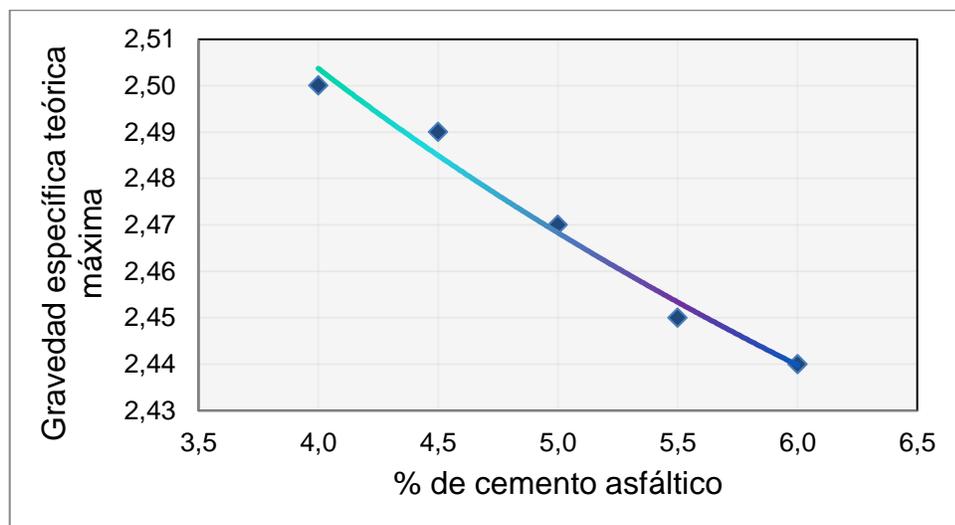
Fuente: elaboración propia.

Figura 14. **Gráfico de gravedad específica teórica máxima (mezcla tradicional)**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

Figura 15. **Gráfico de gravedad específica teórica máxima (mezcla modificada)**



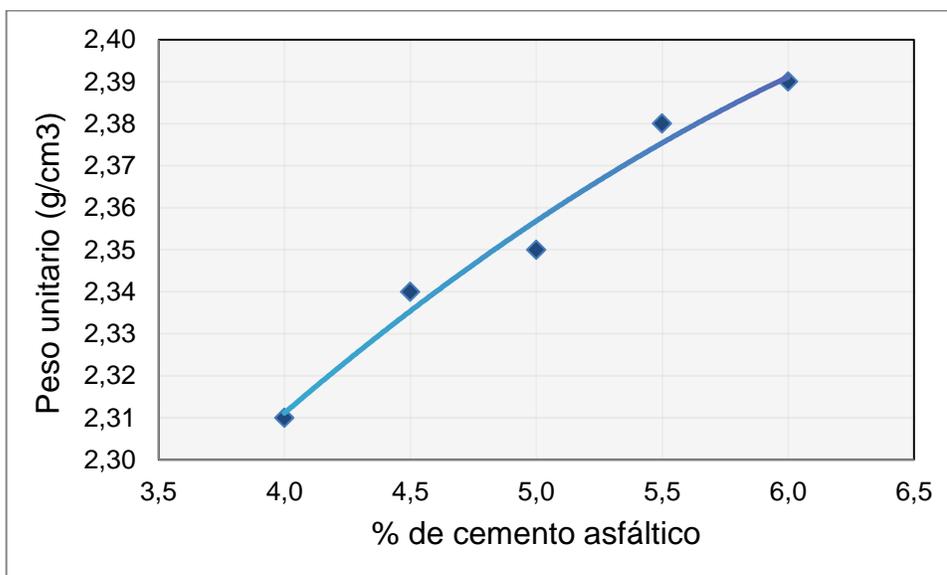
Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

Tabla XXXVI. Cuadro comparativo de peso unitario de la mezcla asfáltica

Porcentaje de cemento asfáltico en la muestra	Mezcla asfáltica tradicional PU (g/cm ³)	Mezcla asfáltica con cal hidratada PU (g/cm ³)	Variación	
			Absoluta	Relativa (%)
4	2,31	2,29	0,02	0,86
4,5	2,34	2,32	0,02	0,85
5	2,35	2,36	0,01	0,42
5,5	2,38	2,37	0,01	0,42
6	2,39	2,38	0,01	0,41

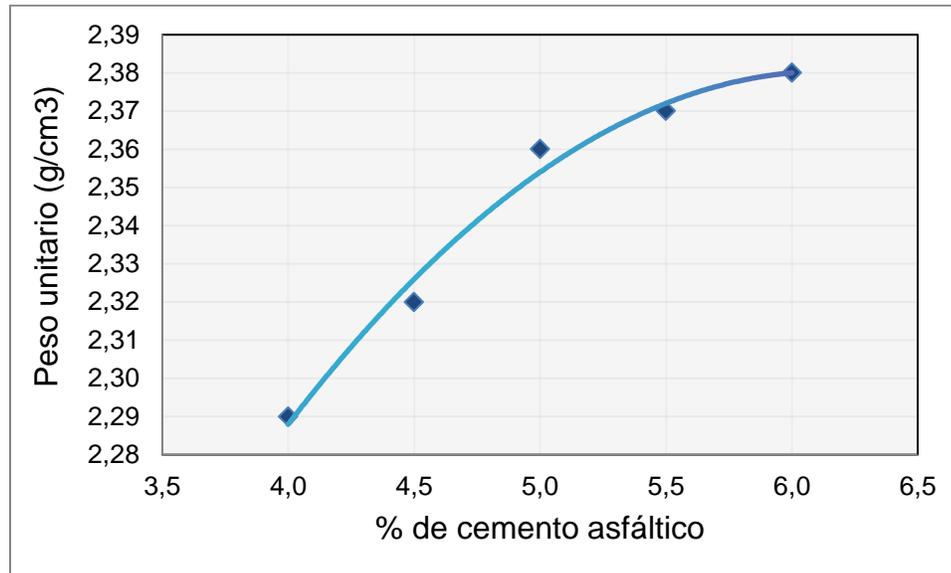
Fuente: elaboración propia.

Figura 16. Gráfico de peso unitario (mezcla tradicional)



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

Figura 17. **Gráfico de peso unitario (mezcla modificada)**



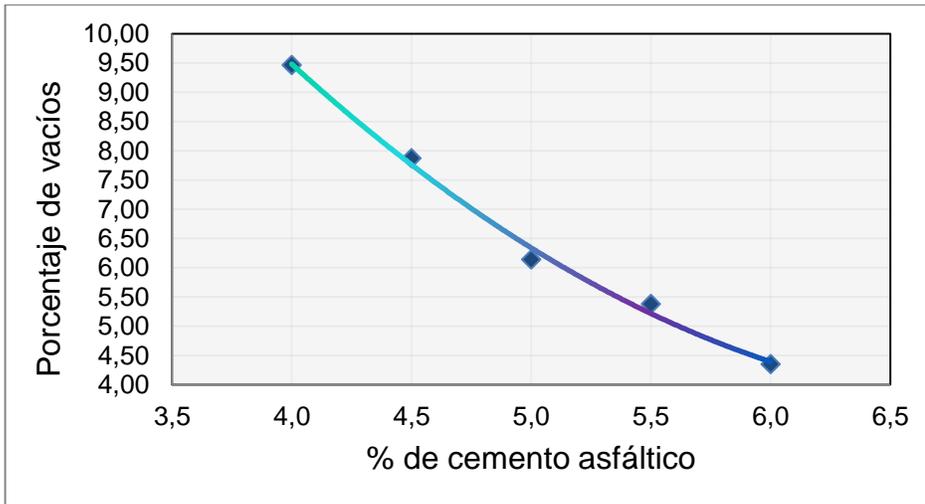
Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

Tabla XXXVII. **Cuadro comparativo de porcentaje de vacíos-densidad**

Porcentaje de cemento asfáltico en la muestra	Mezcla asfáltica tradicional VA (%)	Mezcla asfáltica con cal hidratada VA (%)	Variación	
			Absoluta	Relativa (%)
4	9,46	8,40	1,06	11,20
4,5	7,87	6,82	1,05	13,34
5	6,14	4,45	1,69	27,52
5,5	5,38	3,26	2,12	39,40
6	4,35	2,45	1,90	43,67

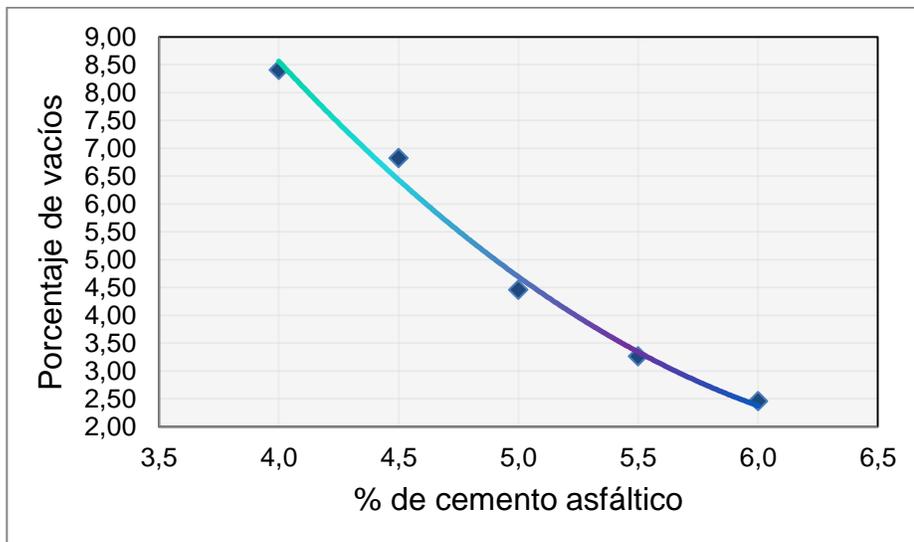
Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Gráfico de porcentaje de vacíos-densidad (mezcla tradicional)**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

Figura 19. **Gráfico de porcentaje de vacíos-densidad (mezcla modificada)**



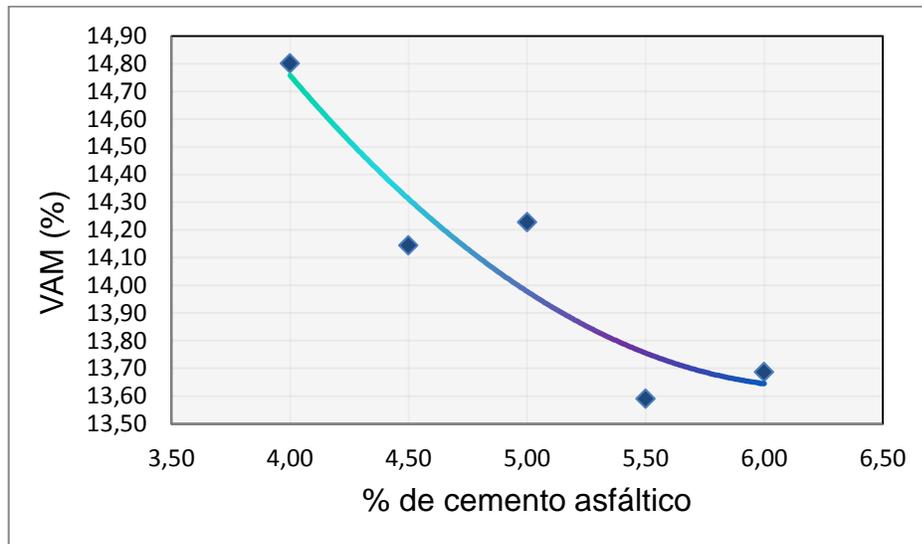
Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

Tabla XXXVIII. Cuadro comparativo de porcentaje de vacíos en el agregado mineral

Porcentaje de cemento asfáltico en la muestra	Mezcla asfáltica tradicional VAM (%)	Mezcla asfáltica con cal hidratada VAM (%)	Variación	
			Absoluta	Relativa (%)
4	14,80	15,36	0,56	3,81
4,5	14,14	14,70	0,56	3,95
5	14,23	13,69	0,54	3,80
5,5	13,59	13,78	0,19	1,37
6	13,69	13,87	0,18	1,35

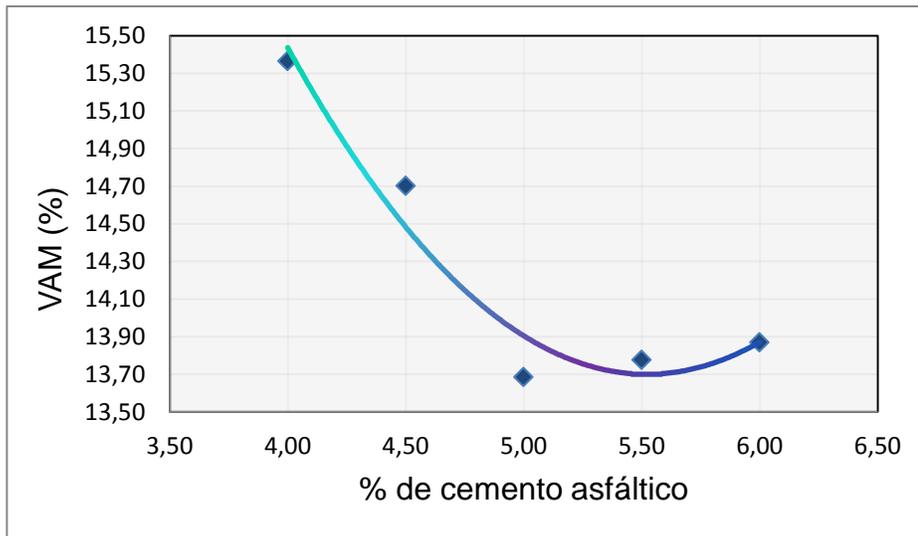
Fuente: elaboración propia.

Figura 20. Gráfico de porcentaje de vacíos en el agregado mineral (mezcla tradicional)



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

Figura 21. **Gráfico de porcentaje de vacíos en el agregado mineral (mezcla modificada)**



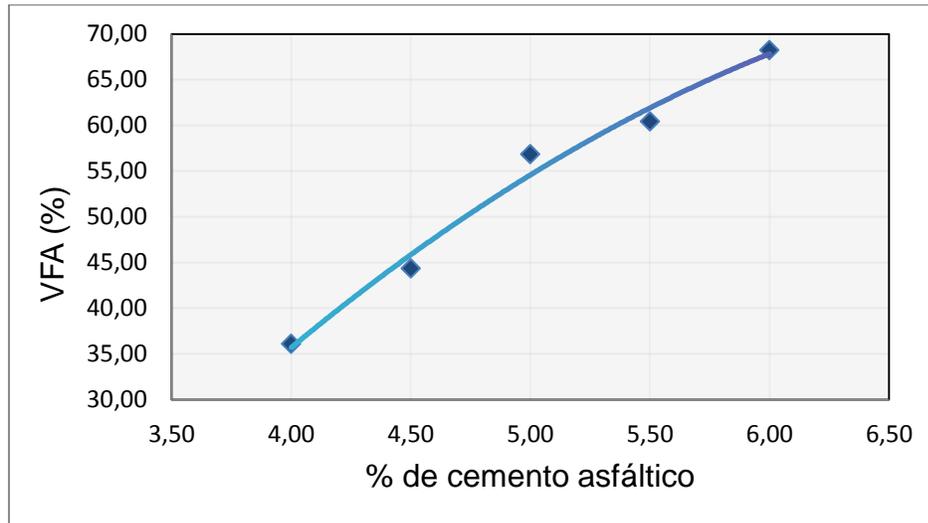
Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

Tabla XXXIX. **Cuadro comparativo de porcentaje de vacíos llenados con asfalto**

Porcentaje de cemento asfáltico en la muestra	Mezcla asfáltica tradicional VFA (%)	Mezcla asfáltica con cal hidratada VFA (%)	Variación	
			Absoluta	Relativa (%)
4	36,08	45,33	9,25	25,63
4,5	44,35	53,61	9,26	20,87
5	56,84	67,48	10,64	18,71
5,5	60,41	76,34	15,93	26,36
6	68,22	82,34	14,12	20,70

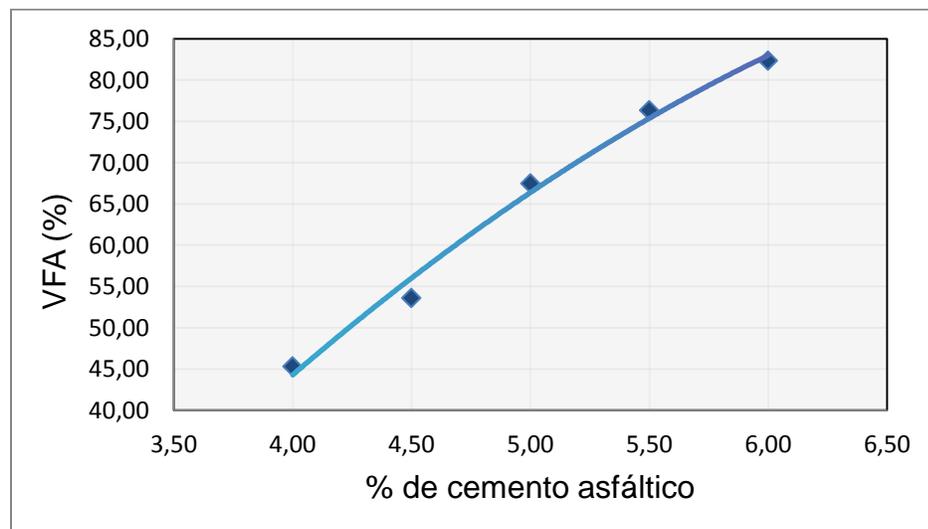
Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Gráfico de porcentaje de vacíos llenados con asfalto (mezcla tradicional)**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

Figura 23. **Gráfico de porcentaje de vacíos llenados con asfalto (mezcla modificada)**



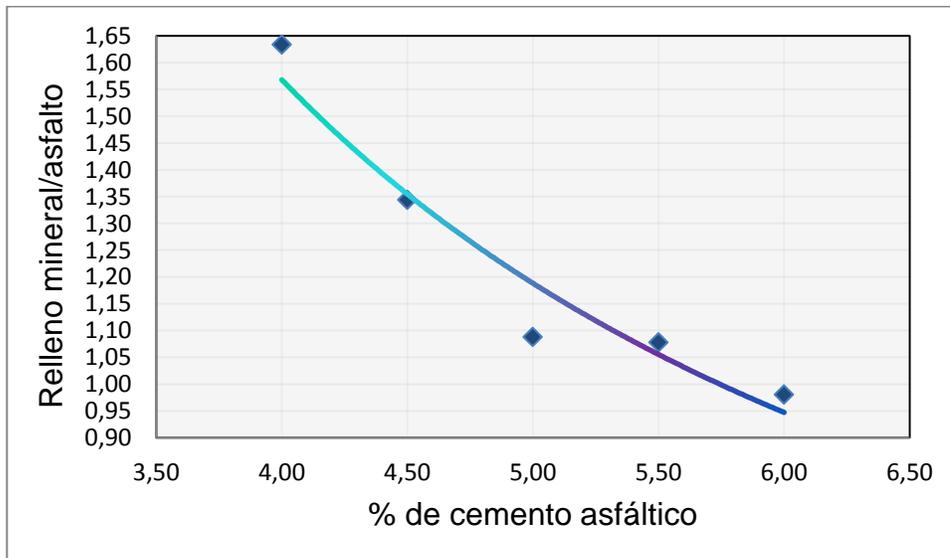
Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

Tabla XL. Cuadro comparativo de relación relleno mineral/asfalto

Porcentaje de cemento asfáltico	Mezcla asfáltica tradicional F/A	Mezcla asfáltica con cal hidratada F/A	Variación	
			Absoluta	Relativa (%)
4	1,63	1,25	0,38	23,30
4,5	1,34	1,12	0,22	16,49
5	1,08	0,97	0,11	10,50
5,5	1,07	0,85	0,21	20,32
6	0,98	0,79	0,18	18,97

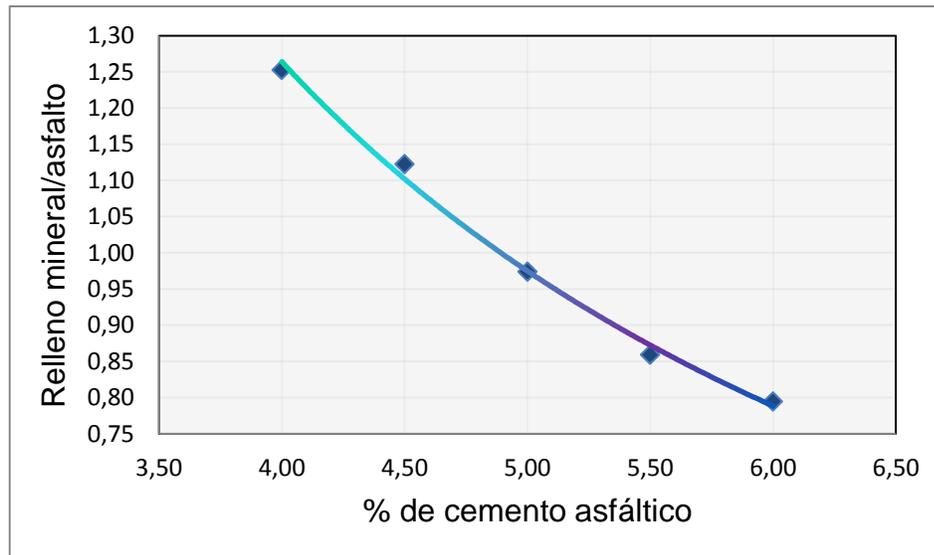
Fuente: elaboración propia.

Figura 24. Gráfico de relación relleno mineral/asfalto (mezcla tradicional)



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

Figura 25. **Gráfico de relación relleno mineral/asfalto (mezcla modificada)**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

Los valores de estabilidad que se presentan en las tablas y figuras, son el promedio de las dos estabilidades obtenidas para cada variación de asfalto según lo indicado en las tablas XXX y XXXI.

Tabla XLI. **Cuadro comparativo de estabilidad Marshall**

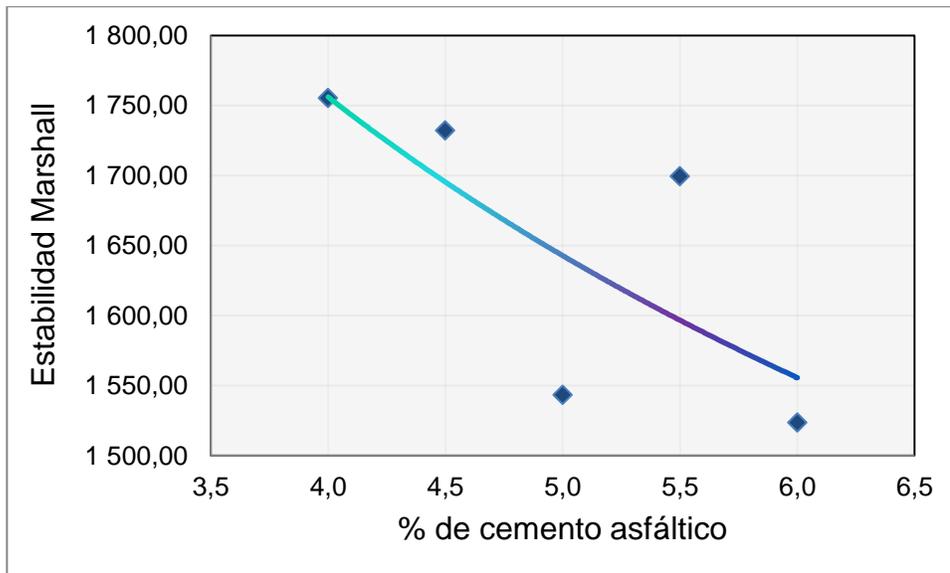
Porcentaje de cemento asfáltico en la muestra	Mezcla asfáltica tradicional estabilidad (lbf)	Mezcla asfáltica con cal hidratada estabilidad (lbf)	Variación	
			Absoluta	Relativa (%)
4	1 755,19	1 305,29	449,90	25,63
4,5	1 732,12	1 844,96	112,83	6,51

Continuación de la tabla XLI.

5	1 543,36	2 116,35	572,99	37,12
5,5	1 699,46	1 898,04	198,58	11,68
6	1 523,67	2 023,36	499,68	32,79

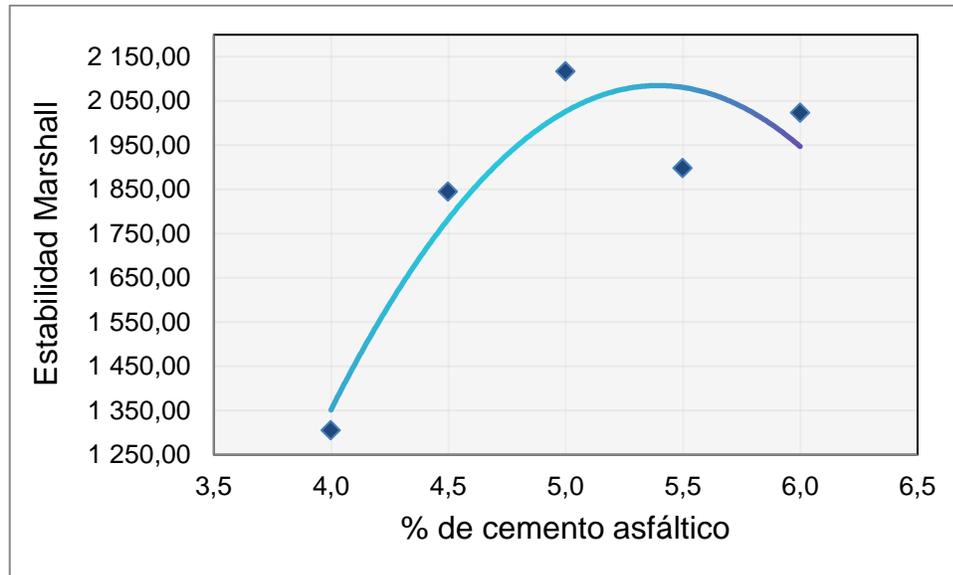
Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Gráfico de estabilidad Marshall (mezcla tradicional)**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

Figura 27. **Gráfico de estabilidad Marshall (mezcla modificada)**



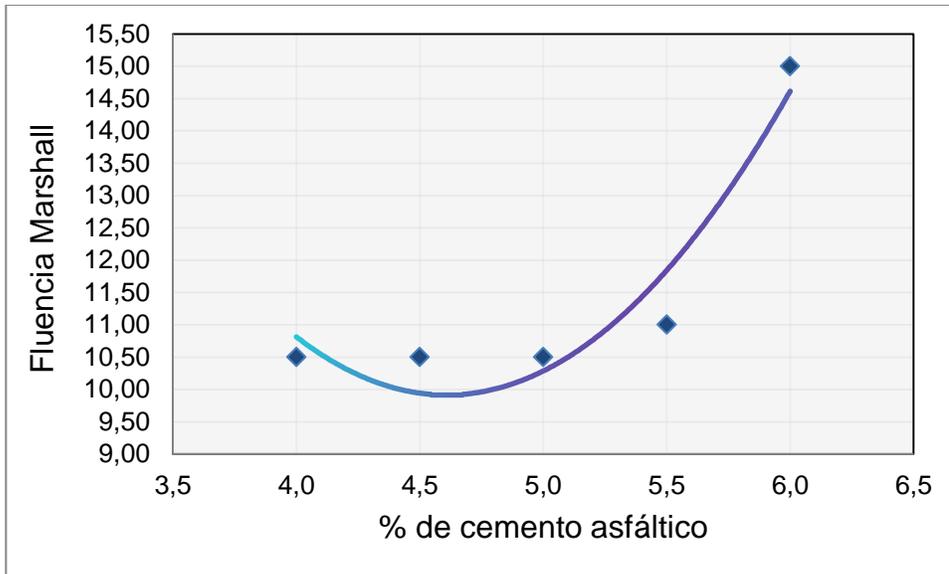
Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

Tabla XLII. **Cuadro comparativo de flujo Marshall**

Porcentaje de cemento asfáltico en la muestra	Mezcla asfáltica tradicional (0.001")	Mezcla asfáltica con cal hidratada (0.001")	Variación	
			Absoluta	Relativa (%)
4	10,5	15,5	5	47,61
4,5	10,5	16	5,5	52,38
5	10,5	17,5	7	66,66
5,5	11	18,5	7,5	68,18
6	15	18	3	20,00

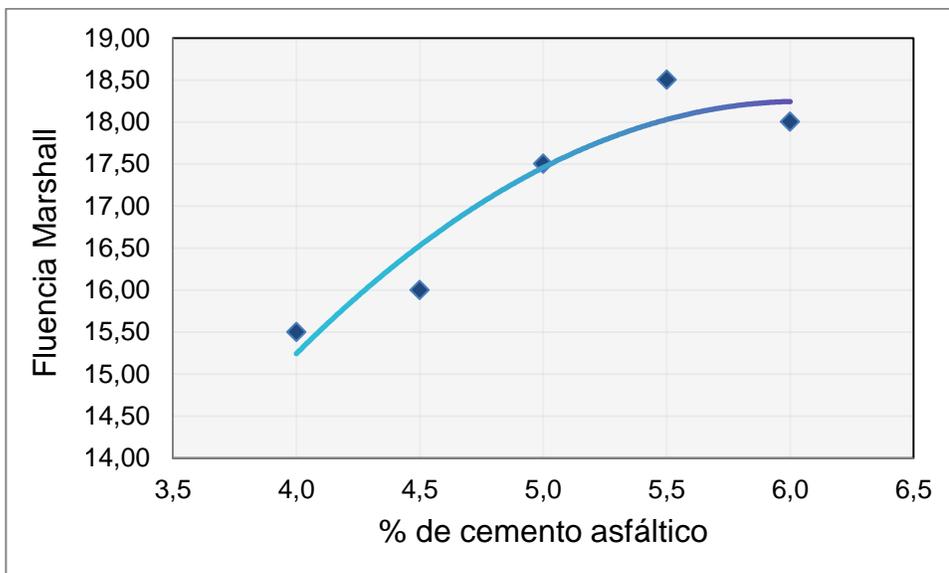
Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Gráfico de flujo Marshall (mezcla tradicional)**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

Figura 29. **Gráfico de flujo Marshall (mezcla modificada)**



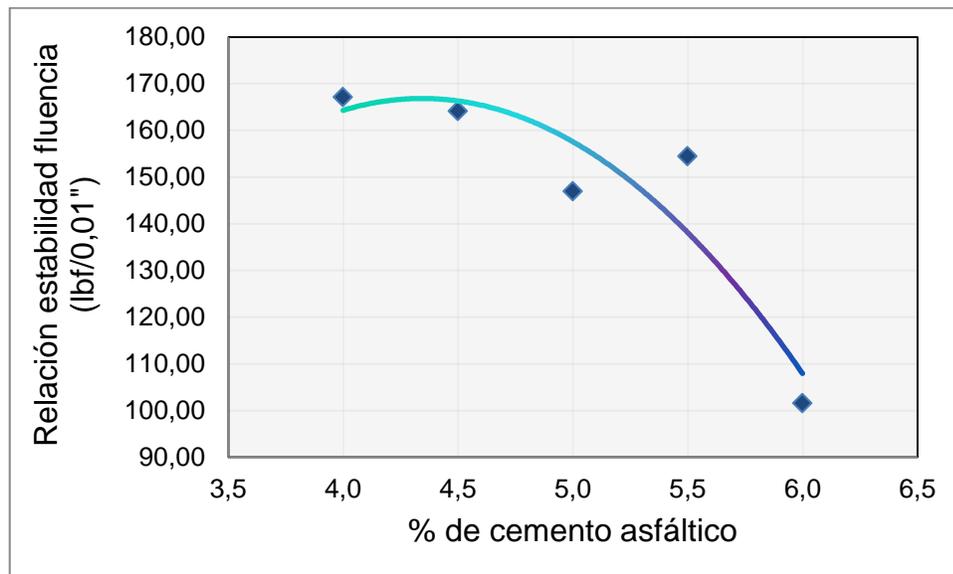
Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

Tabla XLIII. Cuadro comparativo de relación estabilidad-fluencia

Porcentaje de cemento asfáltico en la muestra	Mezcla asfáltica tradicional (lbf/0,01")	Mezcla asfáltica con cal hidratada (lbf/0,01")	Variación	
			Absoluta	Relativa (%)
4	167,16	84,21	82,94	49,62
4,5	164,16	115,31	49,65	30,10
5	146,98	120,93	26,05	17,72
5,5	154,49	102,57	51,89	33,59
6	101,57	112,4	10,83	10,66

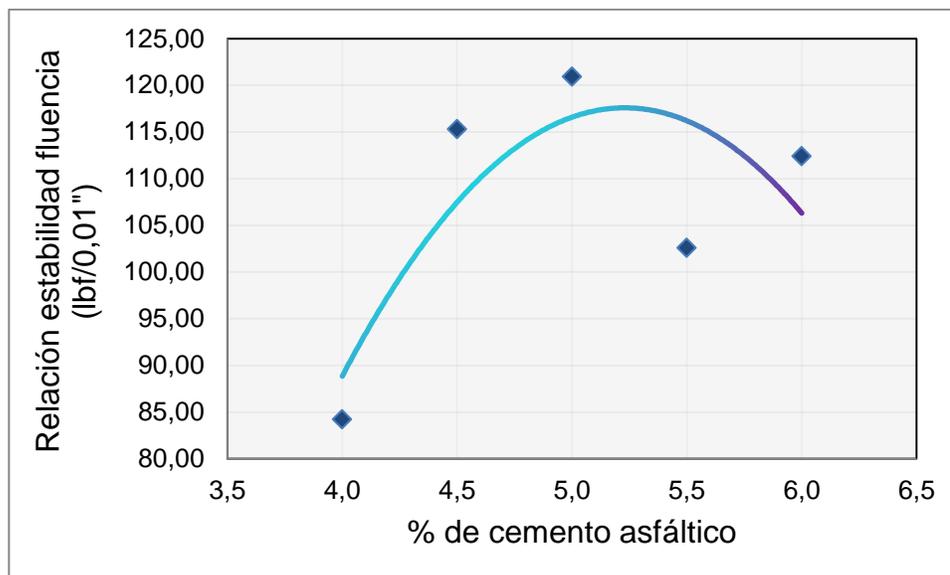
Fuente: elaboración propia.

Figura 30. Gráfico de relación estabilidad-fluencia (mezcla tradicional)



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

Figura 31. **Gráfico de relación estabilidad-fluencia (mezcla modificada)**



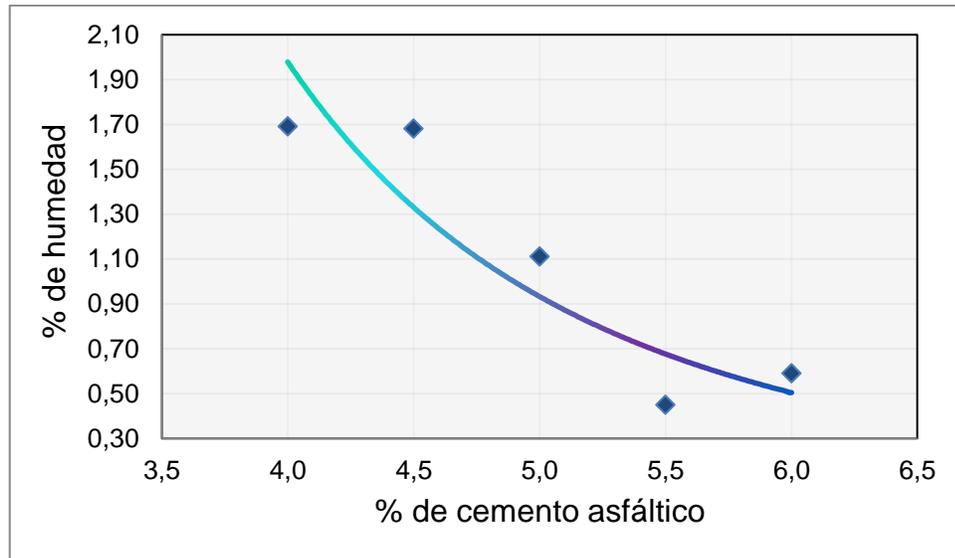
Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

Tabla XLIV. **Cuadro comparativo de porcentaje de humedad**

Porcentaje de cemento asfáltico en la muestra	Mezcla asfáltica tradicional % H	Mezcla asfáltica con cal hidratada % H	Variación	
			Absoluta	Relativa (%)
4	1,69	2,53	0,84	49,70
4,5	1,68	1,12	0,56	33,33
5	1,11	0,64	0,47	42,34
5,5	0,45	0,40	0,05	11,11
6	0,59	0,65	0,06	10,16

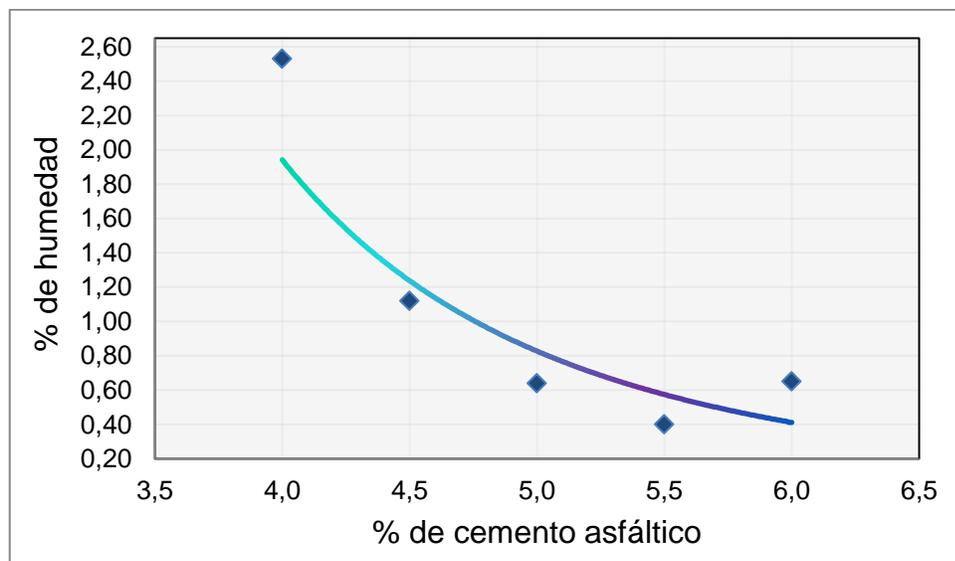
Fuente: elaboración propia.

Figura 32. **Gráfico de porcentaje de humedad (mezcla tradicional)**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

Figura 33. **Gráfico porcentaje de humedad (mezcla modificada)**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

2.2.2. Interpretación de resultados

A continuación se presenta el análisis de los resultados de los diferentes ensayos realizados a los dos tipos de mezcla asfáltica. En esta sección se dará a conocer si las mezclas cumplen con los parámetros de diseño indicados en las *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*, de la Dirección General de Caminos, para cada uno de los respectivos ensayos realizados.

El análisis se presenta en forma separada para la mezcla tradicional y la mezcla modificada, sin embargo, cabe mencionar que, para lograr un análisis más profundo de los resultados, este fue obtenido de la interpretación de las tablas y gráficos comparativos entre ambos tipos de mezclas.

2.2.2.1. Mezcla asfáltica tradicional

El contenido óptimo de cemento asfáltico para el diseño de mezcla tradicional propuesto se encuentra en un rango de 5,5 a 6 %.

Este rango se determinó mediante el ensayo de porcentaje de vacíos en la mezcla, ya que con esta cantidad de ligante, el porcentaje de vacíos se encuentra dentro de los parámetros de diseño indicados en las especificaciones. Como se puede observar en la figura 19, con una cantidad menor a 5,5 % de ligante, la mezcla no cumple con los parámetros, esto se debe a que conforme se incrementa la cantidad de cemento asfáltico, va disminuyendo la presencia de vacíos en la mezcla.

El porcentaje de vacíos en el agregado mineral, siendo en este caso el polvo de roca, se encuentra dentro de los límites de diseño indicados en la tabla

III cuando se utiliza como mínimo un 5 % de cemento asfáltico. Por lo tanto, este ensayo sí cumple con las especificaciones al utilizar el contenido óptimo de cemento asfáltico indicado anteriormente.

La cantidad de vacíos llenados con cemento asfáltico cumple con los parámetros de diseño cuando se llega a utilizar más de 5,75 % de ligante. Como se puede observar en la figura 23, a menor cantidad del mismo, el porcentaje de vacíos llenados con asfalto no cumple con los parámetros.

En cuanto a la relación que existe entre el polvo de roca y el bitumen, se puede ver que todas las relaciones cumplen con las especificaciones para todas las cantidades de asfalto utilizado, ya que en ningún caso la relación es menor a 0,6 ni mayor a 1,6.

Basado en el valor mínimo de estabilidad Marshall (1 200 lbf), que debe tener la mezcla compactada, se observa que la misma cumplió con este ensayo para todos los porcentajes de cemento asfáltico utilizados. El máximo valor de estabilidad se obtuvo utilizando 4 % de ligante, sin embargo, utilizando la cantidad óptima de cemento asfáltico, la estabilidad es menor, pero sigue siendo superior al valor mínimo de diseño indicado anteriormente.

Por su parte, los valores de fluencia Marshall se encuentran todos dentro de los parámetros de diseño. En la figura 29 se puede notar que, con un 6 % de cemento asfáltico, la mezcla tiende a aumentar notablemente su deformación, es decir, que para este caso, la relación entre el aumento en la cantidad de asfalto y la deformación es directamente proporcional.

La relación que hay entre la estabilidad y el flujo Marshall cumple cuando se utiliza hasta un máximo de 5,75 % de asfalto aproximadamente, ya que a más cantidad de este, ya no cumple con el mínimo permisible.

Para el contenido de humedad presente en la mezcla, no se establecen parámetros de diseño, sin embargo, este factor da una idea de la calidad de la mezcla. Se observó que el contenido de humedad presente es inversamente proporcional al porcentaje de cemento asfáltico, a mayor porcentaje de asfalto habrá menor contenido de aire en la mezcla, por lo tanto, la posible presencia de humedad disminuirá.

2.2.2.2. Mezcla asfáltica con cal hidratada

El contenido óptimo de cemento asfáltico para el diseño propuesto de mezcla modificada se encuentra en un rango de 4,80 a 5,60 % aproximadamente.

Al igual que para la mezcla tradicional, la cantidad óptima de cemento asfáltico se determinó por medio del porcentaje de vacíos, ya que con esta cantidad de ligante se garantiza que los vacíos se encuentren dentro de los límites que indican las especificaciones. Con una cantidad de asfalto mayor o menor a la óptima, la mezcla no cumple con los parámetros, los cuales deben de ser no menores a 3 ni mayores a 5 %.

Utilizando cal hidratada como agregado mineral, se puede comprobar que el porcentaje de vacíos en el mismo se encuentra dentro de los límites de diseño al utilizar de 4,75 % de asfalto en adelante. Por lo tanto, el porcentaje de vacíos en la cal se encuentra dentro de los límites de diseño, utilizando el contenido óptimo de cemento asfáltico para este tipo de mezcla.

El porcentaje de vacíos llenados con asfalto, cumplió con los parámetros de diseño cuando se utilizó de 5 a 5,75 % de cemento asfáltico. Pero tomando en cuenta la cantidad óptima de ligante que se debe utilizar, se puede decir que la cantidad de vacíos llenados con asfalto cumple cuando se utiliza de 5 a 5,60 % de ligante.

La relación entre el relleno mineral y el asfalto se encuentra dentro de 0,75 y 1,15, por lo tanto, el material que pasó el tamiz núm. 200 en este caso siendo polvo de roca y cal hidratada, sí cumplió con los parámetros de diseño para todos los porcentajes de asfalto utilizados.

Los valores de estabilidad de la mezcla para cada porcentaje de asfalto, cumplen con el valor mínimo de diseño, siendo este de 1 200 lbf. Con un contenido de asfalto de aproximadamente 5,5 %, se logra la mayor resistencia para el diseño de mezcla propuesto, siendo este valor mayor a las 2 000 lbf. En la figura 28 se observa que, conforme se incrementa el porcentaje de cemento asfáltico, el valor de estabilidad se incrementa, sin embargo, a más de un 5,5 % del mismo, esta presenta un decrecimiento en su resistencia.

En cuanto a los valores de fluencia, se puede notar que estos están cercanos a los valores de diseño, no obstante, la mayoría está fuera de los límites indicados en la tabla II. Los menores valores de deformación se obtuvieron utilizando de 4 a 4,5 % de asfalto, siendo estos no mayores a 16 centésimas de pulgada, valor máximo permisible. Por lo tanto se puede decir, que para el contenido óptimo de asfalto no cumplen los valores de deformación con los límites de diseño.

La relación que existe entre la estabilidad y la fluencia en este caso, queda fuera de los parámetros, ya que con ningún contenido de asfalto se logró llegar

al mínimo valor indicado por las especificaciones (120 lbf/0,01”). Esto se debió, como se observó en las gráficas de fluencia Marshall, que en este tipo de mezcla se produjo un aumento en las deformaciones, por lo tanto es lógico que la relación estabilidad-fluencia fuera menor.

El contenido de humedad va disminuyendo al momento en que se incrementa la cantidad de asfalto, así como se explicó anteriormente, a menor cantidad de vacíos en la mezcla, existirá una posible menor presencia de humedad en la misma.

2.2.3. Beneficios del uso de cal hidratada en la mezcla asfáltica en comparación con una mezcla asfáltica tradicional

Antes de mencionar los beneficios del uso de cal hidratada en la mezcla asfáltica, es importante aclarar, que los beneficios que se mencionan a continuación, son con base en los resultados obtenidos en el presente trabajo, y son aplicables únicamente para la combinación propuesta de agregados, tipo y porcentaje de cemento asfáltico utilizado.

Como se puede observar en la tabulación de resultados y las gráficas entre la mezcla tradicional y la modificada, se tienen ventajas y desventajas al momento de incorporar cal hidratada en una cantidad de 1,5 % del peso total de la mezcla de agregados.

Entre los beneficios que se pueden mencionar, está que al momento de mezclar el cemento asfáltico con la mezcla de agregados pétreos, se obtiene mejor adherencia entre el árido y el ligante, logrando así un mejor acomodo de

las partículas en la mezcla. Con esto se obtiene que el proceso de mezclado sea más rápido, y así evitar posible pérdida de temperatura en la mezcla.

Una de las principales ventajas al incorporar cal hidratada a la mezcla, es la notable reducción del porcentaje de vacíos en comparación con la mezcla tradicional, ya que para cada uno de los contenidos de asfalto, el porcentaje de vacíos se reduce aproximadamente un 2 %.

Así también, la incorporación de cal hidratada a la mezcla, hizo que se alcanzaran los límites de porcentaje de vacíos indicados en las especificaciones, utilizando una menor cantidad de cemento asfáltico.

Otra de las ventajas que se presenta, es el incremento en la resistencia a la deformación. Como se puede observar en los resultados, en la mezcla asfáltica modificada se logró alcanzar una estabilidad Marshall mayor a las 2 000 lbf. En cambio, para la mezcla tradicional, el valor más alto fue aproximadamente de 1 750 lbf.

De cierto modo, al incorporar cal hidratada a la mezcla, también se logra reducir el porcentaje de humedad que pueda contener la misma, ya que al momento de lograr reducir el porcentaje de vacíos, también se reduce el posible contenido de humedad que se pueda encontrar en el pavimento.

2.2.4. Cantidad óptima de cal hidratada presente en una mezcla asfáltica

La cantidad de cal hidratada en la mezcla asfáltica, que haga que esta mejore sus características y propiedades, depende de la combinación de tres

elementos importantes, siendo estos, la granulometría, el tipo y la cantidad de cemento asfáltico utilizado.

Hipotéticamente, la cantidad de cal hidratada que se puede utilizar está en un rango de 1 a 3 % del peso total de la mezcla de agregados. En este trabajo se propuso utilizar 1,5 %, los resultados indicaron que la combinación entre esta cantidad, la granulometría propuesta y el cemento asfáltico AC-20, resultó con beneficios en el aumento a la resistencia, la disminución del porcentaje de vacíos y contenido de humedad, sin embargo, no resultó con mayores beneficios en cuanto a las deformaciones.

Por lo tanto, la cantidad óptima de cal hidratada con la cual se logran mejores resultados en la mezcla asfáltica, deberá ser única para cada una de las combinaciones de agregados, tipo y cantidad de cemento asfáltico que se puedan llegar a realizar.

CONCLUSIONES

1. La adición de cal hidratada a la mezcla asfáltica hizo que se lograra una mejor adherencia entre el cemento asfáltico y los agregados pétreos. Al mejorar la adherencia entre estos elementos se obtiene un mejor acomodo de las partículas en la mezcla, esto hace que sea más difícil la separación de las mismas al momento que se someta a la acción de cargas. Debido a esto la mezcla modificada presentó mayores deformaciones en comparación con la tradición, ya que aumentó su elasticidad.
2. Por medio del ensayo de porcentaje de vacíos-densidad se garantizó que las proporciones volumétricas de la mezcla de agregados pétreos y el cemento asfáltico, estuvieran dentro de rangos adecuados. Es decir, que a partir de este ensayo se determinó el contenido de cemento asfáltico óptimo para la combinación de agregados propuestos, siendo este de 5,5 a 6 % para la mezcla tradicional y de 4,8 a 5,6 para la modificada.
3. Con base en el ensayo de porcentaje de vacíos realizado a la mezcla asfáltica modificada, se comprobó que la cal hidratada sí cumple la función de relleno mineral. Además, esta mezcla presentó mejoras en los resultados en comparación con los de la mezcla tradicional, ya que para lograr que el porcentaje de vacíos alcanzara los parámetros de diseño, se utilizó una menor cantidad de cemento asfáltico.

4. Utilizar cal hidratada como aditivo, en una cantidad de 1,5 % del peso total de agregados de la mezcla asfáltica, puede tener beneficios y desventajas. Los beneficios se presentaron en la reducción de vacíos y el aumento de la resistencia. La única desventaja que se obtuvo fue el incremento en los valores de deformación, lo cual se debió a que la mezcla ganó elasticidad. Sin embargo, esto no es tan favorable, ya que con demasiado incremento en las deformaciones, estas pueden alcanzar un estado plástico, lo que conllevaría a que el pavimento no se comporte de manera flexible.

5. Con el método de ensayo utilizado en el laboratorio, no se recrean las condiciones de carga a las que realmente estará sometido el pavimento, esta es una desventaja al momento de analizar las deformaciones, ya que la deformación que se obtiene en el ensayo es una deformación permanente y no se puede determinar en qué momento la mezcla deja de comportarse elásticamente. El análisis de qué tan elástica o plástica es la mezcla, depende del tipo de deformaciones que se puedan observar durante el tiempo que ha estado en servicio. Debido a esto, no se puede decir que el aumento en la magnitud de las deformaciones en la mezcla modificada sea muy significativa, porque teóricamente la cal hidratada reduce las deformaciones plásticas de la mezcla. Por lo tanto, en un pavimento flexible al que se le ha incorporado cal hidratada podría presentar deformaciones plásticas a una edad más tardía que un pavimento flexible de mezcla asfáltica tradicional.

6. En ambos tipos de mezcla, la resistencia varió dependiendo de la cantidad de cemento asfáltico utilizada. Para todos los contenidos de asfalto, el valor de estabilidad cumplió con los parámetros de diseño. Sin embargo, con el contenido de asfalto óptimo para el diseño de mezcla propuesto, se pudo notar que los valores de estabilidad máximos se obtuvieron en la mezcla modificada. Esto fue el resultado de una mejor compactación la cual se logró, como se mencionó anteriormente, por la mejor adherencia y acomodo de las partículas que se obtuvo al incorporarle cal hidratada.
7. La reducción en el porcentaje de vacíos que se obtuvo en la mezcla modificada en comparación con la tradicional, fue gracias a las características físicas de la cal hidratada, ya que la cal posee un peso volumétrico menor que el polvo roca, logrando así utilizar una mayor cantidad de relleno mineral en la mezcla modificada, sin variar el peso del mismo utilizado en el diseño de mezcla.
8. Una de las ventajas que se produjo con la reducción del porcentaje de vacíos en la mezcla, es la reducción del contenido de humedad. Con esto se logra reducir los posibles cambios de peso volumétrico en el pavimento debido a la presencia de agua.

RECOMENDACIONES

1. Por medio del ensayo de porcentaje de vacíos, determinar el contenido de asfalto óptimo para el diseño de mezcla propuesto. Posteriormente, con esta cantidad de asfalto, comprobar que la mezcla cumpla con los parámetros de diseño de los respectivos ensayos indicados en las *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes*, de la Dirección General de Caminos.
2. Si se quiere utilizar cal hidratada como relleno mineral y al mismo tiempo como aditivo en la mezcla asfáltica, se debe determinar por medio de ensayos de laboratorio, cuál es la cantidad de cal que hará que la mezcla asfáltica mejore sus características y propiedades, siempre y cuando esta cumpla con los parámetros de diseño. En otras palabras, para cada diseño de mezcla asfáltica propuesto existe una cantidad óptima de cal hidratada que debe ser determinada, para que la misma cumpla la función de relleno mineral y de aditivo en la mezcla.
3. Para obtener resultados confiables de los ensayos realizados a la mezcla asfáltica, se recomienda realizar tres probetas por cada variación de contenido de asfalto en la mezcla. Esto se hace, ya que, aunque se utilice el mismo procedimiento para realizar las probetas, estas no son 100 % homogéneas entre ellas. Realizar tres probetas por contenido de asfalto tiene el fin de obtener un resultado confiable del ensayo a partir de un promedio entre las dos probetas que tengan mayor similitud en sus datos numéricos.

4. Para conocer el procedimiento de diseño de la mezcla asfáltica en caliente, los ensayos que se deben realizar y la interpretación de los resultados de los mismos, se puede tomar de guía el *Manual de especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes* de la Dirección General de Caminos de Guatemala y el *Manual de normas de ensayo de materiales para carreteras* del Instituto Nacional de Vías de Colombia, ya que ambos manuales toman como referencia las normas ASTM y AASHTO.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Association of State Highways and Transportation Officials. *Percent air voids in compacted dense and open bituminous paving mixtures*. AASHTO T269. EE.UU.: AASHTO, 2013. 1 600 p.
2. _____ . *Resistance to plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus*. AASHTO T245. EE.UU.: AASHTO, 2013. 1 600 p.
3. _____ . *Specific gravity of compacted bituminous mixtures using saturated surface-dry specimens*. AASHTO T166. EE.UU.: AASHTO, 2013. 1 600 p.
4. _____ . *Theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures*. AASHTO T209. EE.UU.: AASHTO, 2013. 1 600 p.
5. American Society for Testing and Materials. *Hot-mixed, hot-laid bituminous paving mixtures*. ASTM D3515. EE.UU.: ASTM, 2001. 5 p.
6. _____ . *Standard specification for coarse aggregate for bituminous paving mixtures*. ASTM D692. EE.UU.: ASTM, 2000. 2 p.

7. _____ . *Standard specification for fine aggregate for bituminous paving mixtures*. ASTM D1073. EE.UU.: ASTM, 1999. 2 p.
8. _____ . *Standard specification for Mineral Filler for bituminous paving mixtures*. ASTM D 242. EE.UU.: ASTM, 1995. 1 p.
9. _____ . *Test method for resistance of plastic flow of bituminous mixtures using Marshall Apparatus*. ASTM D1559. EE.UU.: ASTM, 2001. 4 p.
10. Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. Guatemala: Cámara Guatemalteca de la Construcción, 2001. 724 p.
11. Instituto Mexicano del Transporte. *Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas*. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2005. 62 p.
12. _____ . *Análisis de la influencia de método de compactación en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas*. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2004. 46 p.
13. Instituto Nacional de Vías. *Manual de normas de ensayo de materiales para carreteras, Secciones 700 y 800, Materiales y mezclas asfálticas y prospección de pavimentos*. Colombia: INVIAS, 2012. 626 p.

APÉNDICES

- Apéndice 1. **Juego de tamices utilizado para la separación por tamaño de las partículas del agregado pétreo**



Fuente: fotografía propia, Laboratorio de Mecánica de Suelos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

- Apéndice 2. **Recipiente con la cantidad de cada uno de los diferentes tamaños de material del diseño de mezcla, previo a ser mezclado para la realización de una pastilla de mezcla asfáltica de 1 200 g.**



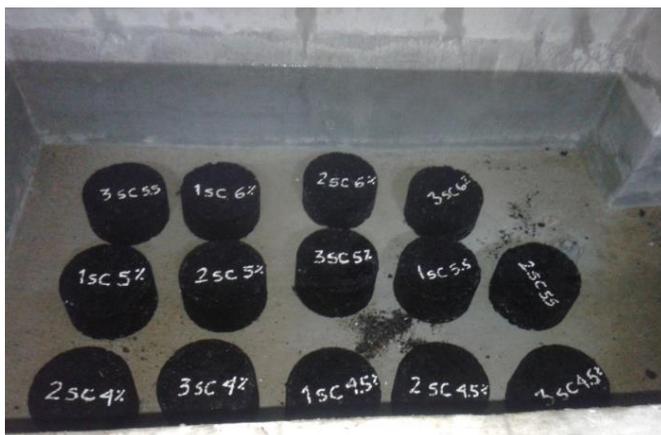
Fuente: fotografía propia, Sección de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Apéndice 3. **Medición de temperatura de la mezcla colocada en el molde previo a la compactación, por medio del termómetro de vástago.**



Fuente: fotografía propia, Sección de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Apéndice 4. **Pastillas de mezcla asfáltica sumergidas en el baño de agua para la determinación de la gravedad específica bruta.**



Fuente: fotografía propia, Sección de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Apéndice 5. **Espécimen de mezcla asfáltica colocado en las mordazas para la realización del ensayo de estabilidad y flujo Marshall.**



Fuente: fotografía propia, Sección de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

ANEXOS

Anexo 1. Tabla Humboldt Mfg. Co. corrección estabilidad Marshall

HUMBOLDT MFG. CO.
7300 W. AGATITE AVE.
NORRIDGE, IL 60706

4 SEP 2007

RECOMMEND RECALIBRATION ONE YEAR FROM START OF USE AFTER LAST CALIBRATION
CALIBRATION FOR MODEL H-4454.100 11000 LBF SERIAL 2366 BY *B. Fleckerman*
CALIBRATED USING LOAD CELL 626314 CAL. DATE 10/11/07 DEFLT=.0001 in.

LBF	DEFLT	LBF	DEFLT	LBF	DEFLT	LBF	DEFLT	LBF	DEFLT
0	.1	1000	105.1	3500	370.0	6000	637.9	8500	908.9
20	2.2	1050	110.4	3550	375.3	6050	643.3	8550	914.4
40	4.3	1100	115.7	3600	380.7	6100	648.7	8600	919.8
60	6.4	1150	121.0	3650	386.0	6150	654.1	8650	925.3
80	8.5	1200	126.2	3700	391.3	6200	659.5	8700	930.7
100	10.5	1250	131.5	3750	396.7	6250	664.9	8750	936.2
120	12.6	1300	136.8	3800	402.0	6300	670.3	8800	941.6
140	14.7	1350	142.0	3850	407.3	6350	675.7	8850	947.1
160	16.8	1400	147.3	3900	412.7	6400	681.1	8900	952.6
180	18.9	1450	152.6	3950	418.0	6450	686.5	8950	958.0
200	21.0	1500	157.9	4000	423.3	6500	691.9	9000	963.5
220	23.1	1550	163.2	4050	428.7	6550	697.3	9050	968.9
240	25.2	1600	168.4	4100	434.0	6600	702.7	9100	974.4
260	27.3	1650	173.7	4150	439.4	6650	708.1	9150	979.9
280	29.4	1700	179.0	4200	444.7	6700	713.5	9200	985.3
300	31.5	1750	184.3	4250	450.1	6750	718.9	9250	990.8
320	33.6	1800	189.6	4300	455.4	6800	724.3	9300	996.3
340	35.7	1850	194.9	4350	460.8	6850	729.7	9350	1001.8
360	37.8	1900	200.1	4400	466.1	6900	735.1	9400	1007.2
380	39.9	1950	205.4	4450	471.5	6950	740.5	9450	1012.7
400	42.0	2000	210.7	4500	476.8	7000	746.0	9500	1018.2
420	44.1	2050	216.0	4550	482.2	7050	751.4	9550	1023.6
440	46.2	2100	221.3	4600	487.5	7100	756.8	9600	1029.1
460	48.3	2150	226.6	4650	492.9	7150	762.2	9650	1034.6
480	50.4	2200	231.9	4700	498.2	7200	767.6	9700	1040.1
500	52.5	2250	237.2	4750	503.6	7250	773.0	9750	1045.6
520	54.6	2300	242.5	4800	508.9	7300	778.5	9800	1051.0
540	56.7	2350	247.8	4850	514.3	7350	783.9	9850	1056.5
560	58.8	2400	253.1	4900	519.7	7400	789.3	9900	1062.0
580	61.0	2450	258.4	4950	525.0	7450	794.7	9950	1067.5
600	63.1	2500	263.7	5000	530.4	7500	800.2	10000	1073.0
620	65.2	2550	269.0	5050	535.8	7550	805.6	10050	1078.5
640	67.3	2600	274.3	5100	541.1	7600	811.0	10100	1084.0
660	69.4	2650	279.6	5150	546.5	7650	816.4	10150	1089.5
680	71.5	2700	284.9	5200	551.9	7700	821.9	10200	1094.9
700	73.6	2750	290.2	5250	557.2	7750	827.3	10250	1100.4
720	75.7	2800	295.5	5300	562.6	7800	832.7	10300	1105.9
740	77.8	2850	300.8	5350	568.0	7850	838.2	10350	1111.4
760	79.9	2900	306.2	5400	573.3	7900	843.6	10400	1116.9
780	82.0	2950	311.5	5450	578.7	7950	849.0	10450	1122.4
800	84.1	3000	316.8	5500	584.1	8000	854.5	10500	1127.9
820	86.2	3050	322.1	5550	589.5	8050	859.9	10550	1133.4
840	88.3	3100	327.4	5600	594.9	8100	865.4	10600	1138.9
860	90.4	3150	332.7	5650	600.2	8150	870.8	10650	1144.4
880	92.5	3200	338.1	5700	605.6	8200	876.2	10700	1149.9
900	94.6	3250	343.4	5750	611.0	8250	881.7	10750	1155.4
920	96.7	3300	348.7	5800	616.4	8300	887.1	10800	1160.9
940	98.8	3350	354.0	5850	621.8	8350	892.6	10850	1166.4
960	100.9	3400	359.3	5900	627.2	8400	898.0	10900	1172.0
980	103.0	3450	364.7	5950	632.5	8450	903.5	10950	1177.5

Fuente: Humboldt Mfg. Co. p. 1.

Anexo 2. **Tabla de factores de corrección estabilidad Marshall**

Volumen de la probeta (cm ³)	Espesor de la probeta		Factor de corrección
	mm	pg	
290 a 301	36,5	1,44	3,03
302 a 316	38,1	1,50	2,78
317 a 328	39,7	1,56	2,50
329 a 340	41,3	1,62	2,27
341 a 353	42,9	1,69	2,08
354 a 367	44,4	1,75	1,92
368 a 379	46,0	1,81	1,79
380 a 392	47,6	1,88	1,67
393 a 405	49,2	1,94	1,56
406 a 420	50,8	2,00	1,47
421 a 431	52,4	2,06	1,39
432 a 443	54,0	2,12	1,32
444 a 456	55,6	2,19	1,25
457 a 470	57,2	2,25	1,19
471 a 482	58,7	2,31	1,14
483 a 495	60,3	2,38	1,09
496 a 508	61,9	2,44	1,04
509 a 522	63,5	2,50	1,00
523 a 535	65,1	2,56	0,96
536 a 546	66,7	2,62	0,93
547 a 559	68,3	2,69	0,89
560 a 573	69,8	2,75	0,86
574 a 585	71,4	2,81	0,83
586 a 598	73,0	2,88	0,81
599 a 610	74,6	2,94	0,78
611 a 626	76,2	3,00	0,76

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes*. Pág. 489

Anexo 3. **Informe de estabilidad y flujo Marshall (mezcla tradicional)**



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



No. 6056

INFORME NUMERO: 007 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 35960

INTERESADO: JAVIER ANTONIO DEL CID MORALES

PROYECTO: TESIS: USO DE CAL HIDRATADA PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS CARACTERISTICAS FISICAS Y PROPIEDADES MECANICAS DE LA MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA

ENSAYO: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 1559

FECHA: 22 DE ABRIL DEL 2016

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
1 TRADICIONAL	1832,89	11
2 TRADICIONAL	1677,50	10
3 TRADICIONAL	1143,85	13
4 TRADICIONAL	1774,11	11
5 TRADICIONAL	1690,13	10
6 TRADICIONAL	1366,22	9
7 TRADICIONAL	1479,41	10
8 TRADICIONAL	1607,31	11

Atentamente,

Vc. Bo. :



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





Ing. Dario Francisco Lucas Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos



FACULTAD DE INGENIERIA —USAC—
 Edificio 1-5, Ciudad Universitaria zona 12
 Teléfono directo: 2418-9113, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
 Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Sección de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Anexo 4. Informe de estabilidad y flujo Marshall (mezcla tradicional)

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

No. **6067**

INFORME NUMERO: 008 L.B.A. ORDEN DE TRABAJO: 35960

INTERESADO: JAVIER ANTONIO DEL CID MORALES

PROYECTO: TESIS: USO DE CAL HIDRATADA PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS
CARACTERISTICAS FISICAS Y PROPIEDADES MECANICAS DE LA
MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA -FIUSAC-

ENSAYO: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 1559

FECHA: 22 DE ABRIL DEL 2016

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

<i>PROBETA</i>	<i>ESTABILIDAD LBF</i>	<i>FLUJO 0,01"</i>
9 TRADICIONAL	1347,51	13
10 TRADICIONAL	1536,29	14
11 TRADICIONAL	1862,63	8
12 TRADICIONAL	1295,43	18
13 TRADICIONAL	1589,63	15
14 TRADICIONAL	1457,58	15
15 TRADICIONAL	1237,29	11

Atentamente,

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


Ing. Dario Francisco Lucas Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos

FACULTAD DE INGENIERIA –USAC–
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 89209 y 89221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Sección de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Anexo 5. Informe de estabilidad y flujo Marshall (mezcla modificada)



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



No. 6058

INFORME NUMERO: 009 L.B.A. ORDEN DE TRABAJO: 35960

INTERESADO: JAVIER ANTONIO DEL CID MORALES

PROYECTO: TESIS: USO DE CAL HIDRATADA PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS CARACTERISTICAS FISICAS Y PROPIEDADES MECANICAS DE LA MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA -FIUSAC-

ENSAYO: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 1559

FECHA: 22 DE ABRIL DEL 2016

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
1 CAL HIDRATADA	1099,97	15
2 CAL HIDRATADA	1510,67	16
3 CAL HIDRATADA	962,31	18
4 CAL HIDRATADA	1647,35	17
5 CAL HIDRATADA	2042,56	15
6 CAL HIDRATADA	1233,64	18
7 CAL HIDRATADA	2210,38	17
8 CAL HIDRATADA	2022,33	18

Atentamente,

Vo. Bo. :



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





Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos



FACULTAD DE INGENIERIA –USAC–
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-9000 Exts. 86208 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Sección de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Anexo 6. Informe de estabilidad y flujo Marshall (mezcla modificada)



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



No. **6069**

INFORME NUMERO: 010 L.B.A. ORDEN DE TRABAJO: 35960

INTERESADO: JAVIER ANTONIO DEL CID MORALES

PROYECTO: TESIS: USO DE CAL HIDRATADA PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS CARACTERISTICAS FISICAS Y PROPIEDADES MECANICAS DE LA MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA -FIUSAC-

ENSAYO: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 1559

FECHA: 22 DE ABRIL DEL 2016

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA ENCALIENTE

PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
9 CAL HIDRATADA	1774,21	19
10 CAL HIDRATADA	1986,10	18
11 CAL HIDRATADA	1809,99	19
12 CAL HIDRATADA	1124,55	14
13 CAL HIDRATADA	2230,63	18
14 CAL HIDRATADA	1816,09	18
15 CAL HIDRATADA	1361,28	17

Atentamente,

Vo. Bb. 

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





Ing. Darío Francisco Lucas Mezarlegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos



FACULTAD DE INGENIERIA – USAC
 Edificio T-6, Ciudad Universitaria zona 12
 Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-9000 Exts. 85209 y 85221 Fax: 2418-9121
 Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Sección de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Anexo 7. Informe de gravedad específica *bulk* (mezcla tradicional)



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



INFORME NUMERO: 011 L.B.A

ORDEN DE TRABAJO: 35960

No. 6070

INTERESADO: JAVIER ANTONIO DEL CID MORALES

PROYECTO: TESIS: USO DE CAL HIDRATADA PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS CARACTERISTICAS FISICAS Y PROPIEDADES MECANICAS DE LA MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA

ENSAYO: GRAVEDAD ESPECIFICA DE BULK ASTM 2726-05a

FECHA: 22 DE ABRIL DEL 2016

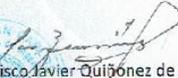
MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

Gmb 1 TRADICIONAL	2,32
Gmb 2 TRADICIONAL	2,35
Gmb 3 TRADICIONAL	2,3
Gmb 4 TRADICIONAL	2,34
Gmb 5 TRADICIONAL	2,34
Gmb 6 TRADICIONAL	2,32
Gmb 7 TRADICIONAL	2,35
Gmb 8 TRADICIONAL	2,34

Gmb 9 TRADICIONAL	2,32
Gmb 10 TRADICIONAL	2,38
Gmb 11 TRADICIONAL	2,37
Gmb 12 TRADICIONAL	2,39
Gmb 13 TRADICIONAL	2,39
Gmb 14 TRADICIONAL	2,39
Gmb 15 TRADICIONAL	2,37

Atentamente,

Vo. Bo. :



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



Ing. Dario Francisco Lucas Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos

FACULTAD DE INGENIERIA –USAC–
Edificio I-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86291 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Sección de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Anexo 8. Informe de gravedad específica *bulk* (mezcla modificada)



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



INFORME NUMERO: 012 L.B.A. ORDEN DE TRABAJO: 35960 No. **6071**

INTERESADO: JAVIER ANTONIO DEL CID MORALES
PROYECTO: TESIS: USO DE CAL HIDRATADA PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS CARACTERISTICAS FISICAS Y PROPIEDADES MECANICAS DE LA MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
ENSAYO: GRAVEDAD ESPECIFICA DE BULK ASTM 2726-05a
FECHA: 22 DE ABRIL DEL 2016
MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

Gmb 1 CAL HIDRATADA	2,28	Gmb 9 CAL HIDRATADA	2,37
Gmb 2 CAL HIDRATADA	2,33	Gmb 10 CAL HIDRATADA	2,37
Gmb 3 CAL HIDRATADA	2,30	Gmb 11 CAL HIDRATADA	2,39
Gmb 4 CAL HIDRATADA	2,35	Gmb 12 CAL HIDRATADA	2,36
Gmb 5 CAL HIDRATADA	2,31	Gmb 13 CAL HIDRATADA	2,41
Gmb 6 CAL HIDRATADA	2,30	Gmb 14 CAL HIDRATADA	2,36
Gmb 7 CAL HIDRATADA	2,36	Gmb 15 CAL HIDRATADA	2,39
Gmb 8 CAL HIDRATADA	2,28		

Atentamente,

Vo. Bo. : 

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



Ing. Dario Francisco Lucas Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos

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

Fuente: Sección de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Anexo 9. Informe de gravedad específica teórica máxima (mezcla tradicional)



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



INFORME NUMERO: 013 L.B.A. ORDEN DE TRABAJO: 35960 No. **6072**

INTERESADO: JAVIER ANTONIO DEL CID MORALES

PROYECTO: TESIS: USO DE CAL HIDRATADA PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS CARACTERISTICAS FISICAS Y PROPIEDADES MECANICAS DE LA MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA

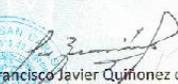
ENSAYO: GRAVEDAD ESPECIFICA TEORICA MAXIMA "RICE" ASTM 2041

FECHA: 22 DE ABRIL DEL 2016

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

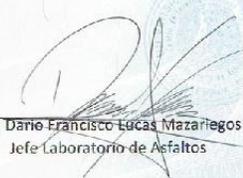
Gmm 4 % TRADICIONAL	2,55
Gmm 4,5 % TRADICIONAL	2,52
Gmm 5 % TRADICIONAL	2,50
Gmm 5,5 % TRADICIONAL	2,51
Gmm 6 % TRADICIONAL	2,50

Atentamente,

Vo. Bo. 

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





Ing. Dario Francisco Lucas Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos



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

Fuente: Sección de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Anexo 10. **Informe de gravedad específica teórica máxima (mezcla modificada)**

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

INFORME NUMERO: 014 L.B.A. ORDEN DE TRABAJO: 35960 No. **6073**

INTERESADO: JAVIER ANTONIO DEL CID MORALES

PROYECTO: TESIS: USO DE CAL HIDRATADA PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS CARACTERISTICAS FISICAS Y PROPIEDADES MECANICAS DE LA MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA

ENSAYO: GRAVEDAD ESPECIFICA TEORICA MAXIMA "RICE" ASTM 2041

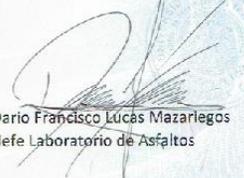
FECHA: 22 DE ABRIL DEL 2016

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

Gmm 4 % CAL HIDRATADA	2,50
Gmm 4,5 % CAL HIDRATADA	2,49
Gmm 5 % CAL HIDRATADA	2,47
Gmm 5,5 % CAL HIDRATADA	2,45
Gmm 6 % CAL HIDRATADA	2,44

Atentamente,

Vo. Bo. : 
Ing. Francisco Javier Quirónez de la Cruz
DIRECTOR CII/USAC


Ing. Dario Francisco Lucas Mazarlegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos

FACULTAD DE INGENIERIA —USAC—
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 80209 y 80221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Sección de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.