



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

**USO DEL CEMENTO PUZOLÁNICO TIPO I (PM) COMO FILLER PARA MODIFICAR
MEZCLAS ASFÁLTICAS, EN CALIENTE POR MEDIO DEL DISEÑO MARSHALL**

Herbert Manuel López Alvarado

Asesorado por el Ing. Yefry Valentín Rosales Juárez

Guatemala, noviembre de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**USO DEL CEMENTO PUZOLÁNICO TIPO I (PM) COMO FILLER PARA MODIFICAR
MEZCLAS ASFÁLTICAS, EN CALIENTE POR MEDIO DEL DISEÑO MARSHALL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

HERBERT MANUEL LÓPEZ ALVARADO

ASESORADO POR EL ING. YEFRY VALENTÍN ROSALES JUÁREZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Nicolás de Jesús Guzmán Sáenz
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel López Juárez
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 DEL CEMENTO PUZOLÁNICO TIPO I (PM) COMO FILLER PARA MODIFICAR MEZCLAS ASFÁLTICAS, EN CALIENTE POR MEDIO DEL DISEÑO MARSHALL

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 03 de noviembre de 2016.

Herbert Manuel López Alvarado

Guatemala, 12 de octubre del 2017.

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

Ingeniero Ordoñez:

Al saludarle cordialmente, me dirijo a usted para informarle que ha sido concluido satisfactoriamente el trabajo de graduación titulado: **“USO DEL CEMENTO PUZOLÁNICO TIPO I (PM) COMO FILLER PARA MODIFICAR MEZCLAS ASFÁLTICAS, EN CALIENTE POR MEDIO DEL DISEÑO MARSHALL”** elaborado por el estudiante Herbert Manuel López Alvarado con carné 200819560, tema para el cual fui asignado como asesor.

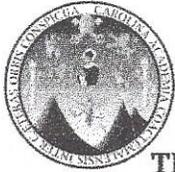
Considero que se han cumplido las metas propuestas al inicio del trabajo, por lo que recomiendo se apruebe en el entendido de que el autor y el suscrito son los responsables de lo trabajado y de las conclusiones del mismo.

Atentamente,



Yefry Valentín Rosales Juárez

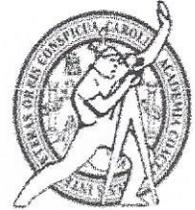
Msc. Ingeniero Civil Colegiado No. 7177



USAC
TRICENTENARIA
 Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

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

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Guatemala,
 27 de octubre de 2017

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 DEL CEMENTO PUZOLÁNICO TIPO I (PM) COMO FILLER PARA MODIFICAR MEZCLAS ASFÁLTICAS, EN CALIENTE POR MEDIO DEL DISEÑO MARSHALL** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Herbert Manuel López Alvarado 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 ENSEÑAN A TODOS


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



FACULTAD DE INGENIERIA
 AREA DE MATERIALES Y
 CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/mrrm.





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

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

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Yefry Valentín Rosales Juárez y Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación del estudiante Herbert Manuel López Alvarado USO DEL CEMENTO PUZOLÁNICO TIPO I (PM) COMO FILLER PARA MODIFICAR MEZCLAS ASFÁLTICAS, EN CALIENTE POR MEDIO DEL DISEÑO MARSHALL da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, noviembre 2017

/mmm.



Mas de 136 años de Trabajo y Mejora Continua

Universidad de San Carlos
de Guatemala

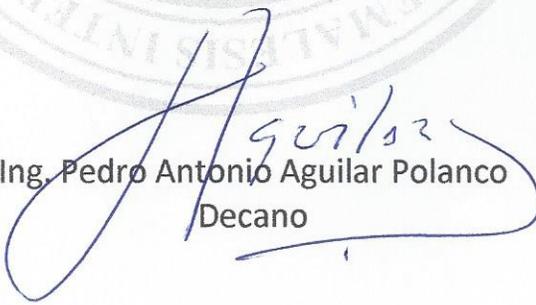


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 579.2017

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 DEL CEMENTO PUZOLÁNICO TIPO I (PM) COMO FILLER PARA MODIFICAR MEZCLAS ASFÁLTICAS, EN CALIENTE POR MEDIO DEL DISEÑO MARSHALL**, presentado por el estudiante universitario: **Herbert Manuel López Alvarado**, 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, noviembre de 2017

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios Padre

Por su amor incondicional, por ser mi fortaleza, mi fe, mi guía, por darme sabiduría a lo largo de mi vida y por brindarme la oportunidad de culminar y celebrar este triunfo con mis seres queridos.

Mis padres

María Matilde Alvarado García y Manuel Delfino López Váldez, por ser mi mayor ejemplo y mi fuente de motivación, por su amor infinito y su apoyo incondicional a lo largo de mi vida. Para ustedes, esta meta lograda.

Mis hermanos

Jaqueline Samara, Ingrid Ivonne, Ligia Paola y Kevin Josse Pablo López, por su amor, apoyo, consejos y por darme la motivación para lograr esta meta, los amo.

Mis abuelos (q. e. p. d.)

Petrona de Jesús García, Julio Alvarado, María Macaria Valdez, Saturnino López, por su amor y consejos.

Mis tíos

Silvia López, Jorge López, Olga Judith, Guadalupe y Roberto Alvarado, por su apoyo en el trayecto de mi carrera.

Mis sobrinos

Fátima Gabriela del Cid, Matheo Alessandro,
Leandro Agustín y Esteban Gabriel Hernández,
por su amor y llenarme la vida de momentos
felices.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por guiarme y llenarme de sabiduría para lograr esta meta.
Toda mi familia	Alvarado y López, por sus muestras de cariño, sus consejos y apoyo en el transcurso de mi carrera.
Ing. Yefry Rosales	Por el apoyo incondicional a lo largo de la elaboración de este trabajo; por su dedicación y compromiso al compartir sus conocimientos y poder así culminar con esta meta.
Ing. José Juan Istupe	Por compartir sus conocimientos, por su dedicación y paciencia, por el apoyo infinito brindado en el laboratorio de asfaltos y, sobre todo, por brindarme su preciada amistad.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios, mi <i>alma mater</i> .
Facultad de Ingeniería	Por acogerme como estudiante, por los conocimientos compartidos por cada uno de los docentes de la escuela de ingeniería civil, para mi formación como profesional.

**Mis amigos de la
sección de Asfaltos**

Por el apoyo y su amistad dentro del proceso de elaboración de los ensayos para este trabajo de graduación.

**Mis amigos de la
Facultad**

Con quienes tuve la dicha de compartir momentos buenos y malos, por su apoyo incondicional, por su amistad y vivencias a lo largo de toda la carrera universitaria.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Estudios realizados de mezclas asfálticas en caliente en Guatemala.....	1
1.1.1. Metodología, diseño y aplicación de un mortero asfáltico modificado (<i>Microsurfacing</i>) para el proyecto M-30 2009.....	1
1.1.1.1. Autor: Ismael Tahuite Arana	2
1.1.1.2. Conclusiones	2
1.1.1.3. Recomendaciones.....	3
1.1.2. Diseño de mezcla de concreto asfáltico drenante, utilizando asfaltos modificados para superficies de rodadura	4
1.1.2.1. Autor: Osmar Libardo Ramírez Turcios.....	5
1.1.2.2. Conclusiones	5
1.1.2.3. Recomendaciones.....	6
2. MARCO TEÓRICO.....	9

2.1.	Clasificación de carreteras en Guatemala.....	9
2.1.1.	Carreteras de primer orden	13
2.1.1.1.	Tipo de tráfico.....	14
2.1.2.	Carreteras de segundo orden.....	14
2.1.2.1.	Tipo de tráfico.....	15
2.1.3.	Carreteras de tercer orden	16
2.1.3.1.	Tipo de tráfico.....	16
2.2.	Recomendaciones de cemento asfáltico a utilizar según su ubicación geográfica, tipo de transporte y carga vehicular.....	17
2.3.	Cemento Portland tipo I (PM).....	17
2.3.1.	Definición.....	18
2.3.2.	Propiedades del cemento puzolánico tipo I (PM)	18
2.3.3.	Estabilizaciones con el cemento puzolánico tipo I (PM)	19
2.3.4.	Material bituminoso	20
2.3.4.1.	Requisitos.....	20
2.3.5.	Relleno mineral en mezclas asfálticas	21
2.3.5.1.	Requisitos.....	22
3.	DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO	23
3.1.	Diseño de mezcla asfáltica por el método Marshall	23
3.1.1.	Metodología.....	23
3.1.2.	Procedimiento	26
3.2.	Preparación de probetas de mezcla asfáltica tradicional	29
3.2.1.	Metodología.....	29
3.2.2.	Procedimiento	33
3.3.	Preparación de probetas con adición de cemento puzolánico tipo I (PM).....	35
3.3.1.	Metodología.....	35

3.3.2.	Procedimiento.....	35
3.4.	Gravedad específica <i>bulk</i> de la mezcla asfáltica	36
3.4.1.	Metodología	36
3.4.2.	Procedimiento.....	38
3.5.	Gravedad específica teórica máxima	39
3.5.1.	Metodología	39
3.5.2.	Procedimiento.....	41
3.6.	Porcentaje de vacíos-densidad	43
3.6.1.	Metodología	43
3.6.2.	Procedimiento.....	44
3.7.	Prueba de estabilidad-flujo Marshall.....	44
3.7.1.	Metodología	45
3.7.2.	Procedimiento.....	47
3.8.	Contenido de humedad presente en la mezcla	48
3.8.1.	Metodología	48
3.8.2.	Procedimiento.....	49
4.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	51
4.1.	Resultados de los ensayos.....	51
4.1.1.	Gravedad específica, <i>bulk</i>	51
4.1.1.1.	Resultados.....	51
4.1.2.	Gravedad específica teórica máxima.....	54
4.1.2.1.	Resultados.....	54
4.1.3.	Porcentaje de vacíos-densidad.....	56
4.1.3.1.	Resultados.....	56
4.1.4.	Prueba de estabilidad-flujo Marshall.....	58
4.1.4.1.	Resultados.....	59
4.1.5.	Porcentaje de humedad.....	60
4.1.5.1.	Resultados.....	61

5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	65
5.1.	Tabulación de resultados	65
5.2.	Beneficios del uso del cemento puzolánico tipo I (PM) en mezcla asfáltica en comparación con una mezcla asfáltica tradicional.....	75
5.3.	Cantidad óptima de cemento puzolánico tipo I (PM) en mezcla asfáltica.....	76
	CONCLUSIONES.....	79
	RECOMENDACIONES	81
	BIBLIOGRAFÍA.....	83
	APÉNDICES.....	85
	ANEXOS.....	89

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Mapa de rutas centroamericanas.....	10
2.	Mapa de rutas nacionales	11
3.	Mapa red vial primaria.....	13
4.	Mapa red vial secundaria	15
5.	Curva granulométrica del diseño de mezcla asfáltica	29
6.	Equipo utilizado para calentar agregados, cemento asfáltico	31
7.	Equipo utilizado para calentar mezcla asfáltica y medición de temperatura.....	31
8.	Pedestal de compactación y termómetro para medición de temperatura.....	32
9.	Equipo de medición de material para mezcla asfáltica.....	32
10.	Balanza provista de dispositivo de suspensión	37
11.	Pileta de agua para suspensión de probeta	38
12.	Bomba de vacío, picnómetro para vacío y dispositivo de agitación. Dispositivo para atrapar el vapor de agua y manómetro de presión residual.....	41
13.	Anillo dinamométrico y deformímetro de lectura fija.....	46
14.	Recipiente con control termostático	47
15.	Gráfico de gravedad específica <i>bulk</i>	66
16.	Gráfico de gravedad específica teórica máxima	67
17.	Gráfico de porcentaje de vacíos-densidad	69
18.	Gráfico de estabilidad Marshall	70
19.	Gráfico de flujo Marshall.....	72

20.	Gráfico de relación estabilidad-fluencia	73
21.	Gráfico de porcentaje de humedad.....	74

TABLAS

I.	Especificaciones del cemento asfáltico.....	21
II.	Requisitos para mezcla de concreto asfáltico	24
III.	Vacíos en el agregado mineral (VAM)	26
IV.	Graduación de agregados para pavimentos de concreto asfáltico (ASTM D 3515).....	27
V.	Diseño de mezcla asfáltica	28
VI.	Resultados de gravedad específica <i>bulk</i> (mezcla tradicional)	52
VII.	Resultados de gravedad específica <i>bulk</i> (mezcla modificada)	53
VIII.	Resultados de gravedad específica teórica máxima (mezcla tradicional)	54
IX.	Resultados de gravedad específica teórica máxima (mezcla modificada)	55
X.	Resultados de porcentaje de vacíos-densidad (mezcla tradicional)	56
XI.	Resultados de porcentaje de vacíos-densidad (mezcla modificada)	57
XII.	Resultados de estabilidad-flujo Marshall (mezcla tradicional).....	59
XIII.	Resultados de estabilidad-flujo Marshall (mezcla modificada).....	60
XIV.	Resultados de porcentajes de humedad (mezcla tradicional).....	61
XV.	Resultados de porcentaje de humedad (mezcla modificada)	62
XVI.	Cuadro comparativo de gravedad específica <i>bulk</i>	65
XVII.	Cuadro comparativo de gravedad específica teórica máxima	67
XVIII.	Cuadro comparativo de porcentaje de vacíos-densidad	68
XIX.	Cuadro comparativo de estabilidad Marshall	70
XX.	Cuadro comparativo de flujo Marshall.....	71
XXI.	Cuadro comparativo de relación estabilidad-fluencia.....	72

XXII. Cuadro comparativo de porcentaje de humedad 74

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
AC	<i>Asphalt cement</i>
CR	Caminos rurales
cS	<i>centiStokes</i>
Delft	Deformación igual a 0,0001"
ESAL	<i>Equivalent simple axial load</i> (factor de equivalencia de carga)
Ftn	Franja transversal del norte
G	Gramos
G_{mb}	Gravedad específica <i>bulk</i> de la mezcla asfáltica
G_{mm}	Gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica
kms	Kilómetros
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
mts	Metros
mm	Milímetros

mm Hg	Milímetros de mercurio
Pa-s	Pascales-segundo
% H	Porcentaje de humedad
VA	Porcentaje de vacíos
VAM	Porcentaje de vacíos en el agregado mineral
<i>psi</i>	<i>Pounds-force per square inch</i> (libras-fuerza por pulgada cuadrada)
PM	Puzolánica modificada
CA	Rutas centroamericanas
RD	Rutas departamentales
RN	Rutas nacionales

GLOSARIO

AASHTO	Siglas en inglés para la American Association of State Highway and Transportation Officials (La Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes)
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.
ASTM	Siglas en inglés para la American Society of Testing Materials (Asociación Americana de Ensayos de Materiales).
Bitumen	Mezcla de líquidos orgánicos altamente viscosa, compuesta principalmente de hidrocarburos aromáticos policíclicos.
Bomba de vacío	Máquina utilizada para extraer, impulsar o elevar moléculas de gas de un volumen sólido.

Cemento asfáltico	Aglomerante proveniente de la fracción pesada de la destilación del petróleo crudo.
Cemento puzolánico tipo I (PM)	Cemento portland al cual se le ha agregado un material activo (puzolana). Conocido comúnmente como UGC.
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.
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.

Hidroplaneo	Pérdida de tracción y control de un vehículo sobre una carretera de superficie cubierta de agua a cierta velocidad.
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.
Mastic	Mezcla de cemento asfáltico (betún) y elementos minerales (agregados finos).
Mexphalte	Mezcla de piedra caliza y bitumen.
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.
PG	Siglas en inglés para clasificar un cemento asfáltico <i>Performance Grade</i> (Grado de Desempeño).
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.
Viscosidad	Medida de la resistencia a la deformación de un fluido producida por fuerzas cortantes.

RESUMEN

El propósito del presente trabajo es la comparación y el análisis del comportamiento que tiene una mezcla asfáltica tradicional y una mezcla asfáltica modificada con cemento puzolánico tipo I (PM) como filler. Dicha comparación nos será útil para determinar si el cemento es de beneficio dentro de un diseño de mezcla asfáltica en caliente.

En la parte inicial del trabajo se describen antecedentes, son estudios realizados de mezclas asfálticas en caliente en Guatemala, los cuales se tomaron como referencia para el presente trabajo, en dichos estudios se dio a conocer las conclusiones y recomendaciones que nos proporcionan cada uno de los autores de los mismos. En la segunda parte de la investigación se encuentra el marco teórico, aquí se presenta la clasificación en que se encuentran distribuidas la carreteras en Guatemala; también se encuentran definiciones y las propiedades de los materiales a utilizar.

En la tercera parte se muestra la descripción del experimento. En esta sección se encuentran la metodología y el procedimiento que ha utilizado para el desarrollo de los diferentes ensayos que se realizaron.

En la cuarta parte se muestra el desarrollo experimental. Se presentan los datos obtenidos en los ensayos y cálculos correspondientes a los mismos.

En la quinta parte del trabajo se presenta el análisis de resultados. En esta sección se muestran los resultados obtenidos, la comparación y la interpretación de los resultados.

OBJETIVOS

General

Desarrollar una mezcla asfáltica modificada añadiendo cemento puzolánico tipo I (PM). Para determinar su uso en la mezcla como relleno y, a su vez, como un aditivo para el mejoramiento de la misma.

Específicos

1. Elaborar dos tipos de mezclas asfálticas, la primera una mezcla tradicional y la segunda en la que se incorpore cemento puzolánico tipo I (PM) como aditivo, en una cantidad de 2 % del peso total de la mezcla de agregados.
2. Comprobar el uso del cemento puzolánico tipo I (PM) en la mezcla asfáltica en una cantidad de 2 % del peso total de los agregados, para determinar si es la cantidad óptima para utilizarlo como relleno mineral y aditivo.
3. Establecer la función que desempeña el cemento tipo I (PM) en la mezcla asfáltica modificada y comprobar que la cantidad en función del peso propuesta es la adecuada para el estudio a realizar.

INTRODUCCIÓN

Los pavimentos asfálticos son una parte importante en el desarrollo de Guatemala, ya que contribuyen al tráfico de mercancías y bienes de la nación, razón por la cual es necesario modificar y mejorar el diseño de mezcla asfáltica, para que cumpla y resista las condiciones climáticas, de tránsito y económicas necesarias, dependiendo de la región en donde se colocará.

En el diseño de mezcla, además de cemento asfáltico y agregados pétreos, es permitido el uso de modificadores para mejorar una mezcla tradicional de asfalto; se utilizará cemento puzolánico tipo I (PM), como un agente de filler en mezclas en caliente.

Para ello, se ha decidido llevar a cabo un estudio en el cual incorporaremos cemento puzolánico tipo I (PM) a la mezcla asfáltica, el cual cumplirá la función de filler mineral para el llenado de vacíos. El cemento puzolánico tipo I (PM) es muy conocido por su uso en la construcción de edificaciones, por medio del concreto, el cual ha sido de muchos beneficio gracias a sus propiedades de resistencia a la compresión y endurecimiento.

Mediante dos mezclas asfálticas, la primera de tipo tradicional y la segunda modificada con el cemento puzolánico tipo I (PM) como filler, se comprobarán los beneficios de la mezcla modificada, mediante los diseños de concreto asfáltico, usando el método Marshall. Con ello se podrá comparar los resultados de dichos ensayos y conocer las diferencias entre las mezclas y poder determinar si el cemento puzolánico tipo I (PM) puede cumplir la función de relleno mineral.

Por medio de los resultados, se llevará a cabo el análisis de la comparación entre los dos tipos de mezclas, con el objetivo de determinar los posibles beneficios que conlleva la incorporación del cemento puzolánico tipo I (PM) en mezclas asfálticas en caliente. Para contribuir en la calidad y mejoramiento del diseño de mezclas asfálticas en caliente como aporte para la elaboración de más carreteras que sean de beneficio para el país.

1. ANTECEDENTES

En esta sección se presentan algunos antecedentes de estudios similares realizados hace unos años, los cuales los presentamos de forma breve, tomando en cuenta las conclusiones y recomendaciones a las que llegaron cada uno de los autores.

1.1. Estudios realizados de mezclas asfálticas en caliente en Guatemala

Previo a la realización de este trabajo de investigación, se citaron dos temas relacionados con mezclas asfálticas modificadas para uso de carpeta de rodadura en carreteras de Guatemala, los cuales se presentan de forma breve, con el objetivo de dar a conocer las conclusiones y recomendaciones a las que llegaron cada uno de los autores.

1.1.1. Metodología, diseño y aplicación de un mortero asfáltico modificado (*Microsurfacing*) para el proyecto M-30 2009

Con fines de crear una guía básica para el diseño y aplicación de un mortero asfáltico modificado o micropavimento, iniciando con una descripción de las características del banco del que fueron extraídos los materiales utilizados en el proyecto de mejoramiento de la red vial pavimentada (M-30-2009), se consideran las propiedades de los distintos materiales que conforman el mortero con enfoque principal en sus características mecánicas y físicas, ya que de ellas depende en gran medida el comportamiento final del

micropavimento; sumado a esto se anotan las normas, tanto nacionales como internacionales, en las cuales se basa el diseño del mortero y la selección de los materiales que lo componen.

Informe en el cual se recopile la información necesaria para que el estudiante, profesional de ingeniería o el lector, posea una guía básica obtenida mediante documentos bibliográficos, datos de laboratorio y experiencia en el campo de la metodología, para una buena aplicación de un mortero asfáltico modificado.

1.1.1.1. Autor: Ismael Tahuite Arana

Para el estudio de metodología, diseño y aplicación de un mortero asfáltico modificado (*microsurfacing*) para el proyecto M-30 2009, el autor, Ingeniero Ismael Tahuite Arana, presenta dicho trabajo de investigación en febrero de 2 011, ante la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, con el objetivo de ofrecer información necesaria para el control de calidad en la aplicación de la mezcla en campo.

Otro objetivo que cita el autor es la elaboración de una guía de los ensayos de laboratorio necesarios para un buen diseño de mezcla de mortero asfáltico modificado.

1.1.1.2. Conclusiones

Luego de todos los estudios y ensayos correspondientes para dicho tema, el autor nos indica las conclusiones a las que llegó:

Un buen diseño de un mortero asfáltico que cumpla con los estándares mínimos normados, hará que la vida útil del pavimento sea la deseada, minimizando costos de reparación.

Un buen diseño y la correcta aplicación del mortero asfáltico modificado, da como resultado la estética a la carretera, la cual es de suma importancia, ya que esta transmite seguridad al conductor al transitar sobre un trabajo realizado correctamente.

El aditivo retardante es indispensable para aplicaciones de mortero asfáltico modificado con emulsión de rompimiento rápido, como en este caso; no así en las de rompimiento lento.

La reparación preliminar de fallas ya existentes en la carpeta de rodadura es fundamental y contribuirá a que el micropavimento cumpla con todas sus funciones, ya que este, a pesar de ser modificado mediante aditivos, no es un pavimento estructural.

1.1.1.3. Recomendaciones

El autor posteriormente nos presenta las recomendaciones necesarias que el considera, para que el estudio realizado sea óptimo y poder así llegar al objetivo principal que es un informe de una buena aplicación de un mortero asfáltico modificado:

Desarrollar los procedimientos para los ensayos, tanto de materiales, como de la mezcla, basándose en normas nacionales e internacionales, ya que estas han sido elaboradas por profesionales y basadas en experiencia y práctica.

La calibración de la dosificación de los materiales debe hacerse al inicio de un proyecto y verificarse por lo menos una vez al mes o cuando varíe uno de los elementos de la mezcla.

Algo no mencionado durante el trabajo y que forma parte muy importante en la ejecución del proyecto, es la implementación de la seguridad industrial, como la señalización del tramo y protección de los trabajadores durante la aplicación.

Realizar la inspección previa a la superficie con una supervisión adecuada y con personal consciente de la importancia que esta conlleva para la futura vida del micropavimento.

1.1.2. Diseño de mezcla de concreto asfáltico drenante, utilizando asfaltos modificados para superficies de rodadura

El propósito de dicho estudio es la creación de un documento en donde se desarrollen alternativas en lo que respecta a este problema generado en la superficie del pavimento, dando lugar a la implementación de mezclas asfálticas drenantes, utilizando asfaltos modificados para superficies de rodadura, las cuales presentan un adecuado comportamiento al tránsito bajo condiciones de diseño adecuadas.

El principal objetivo de la mezcla drenante al utilizarla como carpeta de rodadura es minimizar el fenómeno de hidropelaje, reducir el nivel de ruido y proveer a la vía de una excelente rodadura, en dicho informe se incluyen ensayos de laboratorio, tanto de los materiales a utilizar como a la mezcla

conformada para el estudio, experiencia en campo para el diseño de mezclas de concreto asfáltico drenante, mediante un asfalto modificado para las superficies de rodadura.

1.1.2.1. Autor: Osmar Libardo Ramírez Turcios

Para el estudio diseño de mezcla de concreto asfáltico drenante, utilizando asfaltos modificados para superficies de rodadura, el autor Ingeniero Osmar Libardo Ramírez Turcios, presenta dicho trabajo de investigación en agosto de 2 009, ante la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, con la asesoría por el Ingeniero Irvin Benjamín Martínez Quevedo.

1.1.2.2. Conclusiones

Se presentan algunas de las conclusiones a las cuales el autor llegó, luego de todos los estudios correspondientes para dicho tema:

Para elegir de forma sencilla y práctica el modificador adecuado para un asfalto, se evalúa, tanto su compatibilidad con los agregados como el comportamiento del asfalto ya modificado de acuerdo a la temperatura de desempeño en campo, o sea las condiciones climáticas a las que estará expuesta la mezcla asfáltica.

En el diseño de mezclas asfálticas drenantes se busca un compromiso entre el porcentaje de vacíos de aire y la resistencia al desgaste de la misma. Para este diseño por la practicidad del método y la accesibilidad a los equipos de laboratorio, se escogió la Metodología de Diseño Cántabro. Debido al nivel de exigencias impuestas por el tránsito a las mezclas drenantes como

superficies de rodadura y a su alto contenido de vacíos de aire, es necesario que las propiedades físico-mecánicas de los materiales que integran la granulometría, sea excelentes. Para nuestro proyecto y de acuerdo al caso práctico, la curva granulométrica seleccionada y el porcentaje de asfalto óptimo modificado con *Mexphalte* PM Tipo II de 4,8 %, sí cumplen con la permeabilidad, el porcentaje de vacíos de aire y el desgaste máximo permitido es menor al establecido.

Debido a la gran cantidad de vacíos de aire en la mezcla drenante, el principal problema es el endurecimiento del asfalto, lo que provoca desprendimiento de los áridos, para lo que es necesario usar asfaltos modificados que proporcionen un espesor mayor de película al agregado.

1.1.2.3. Recomendaciones

Luego de dar las respectivas conclusiones de los resultados obtenidos, el autor nos indica algunas recomendaciones para su estudio:

La mezcla drenante se caracteriza por su alto contenido de vacíos de aire, por lo que se recomienda considerar el mantenimiento adecuado de la capa, para no perder el objetivo de la drenabilidad en la misma.

Una de las principales características de la mezcla drenante es la eliminación rápida del agua en la superficie del pavimento, por ello se recomienda la utilización de este tipo de mezcla en zonas del país, donde la intensidad de lluvia sea alta y continua, para garantizar al usuario el desplazamiento seguro sobre la superficie, aún en condiciones de lluvia.

En algunos casos, se recomienda el uso de esta capa en aquellos lugares donde sea necesario controlar el ruido que las llantas provocan, principalmente en donde, por razones humanitarias, sea necesario el silencio, ya que su porosidad disminuye el ruido al paso del neumático.

2. MARCO TEÓRICO

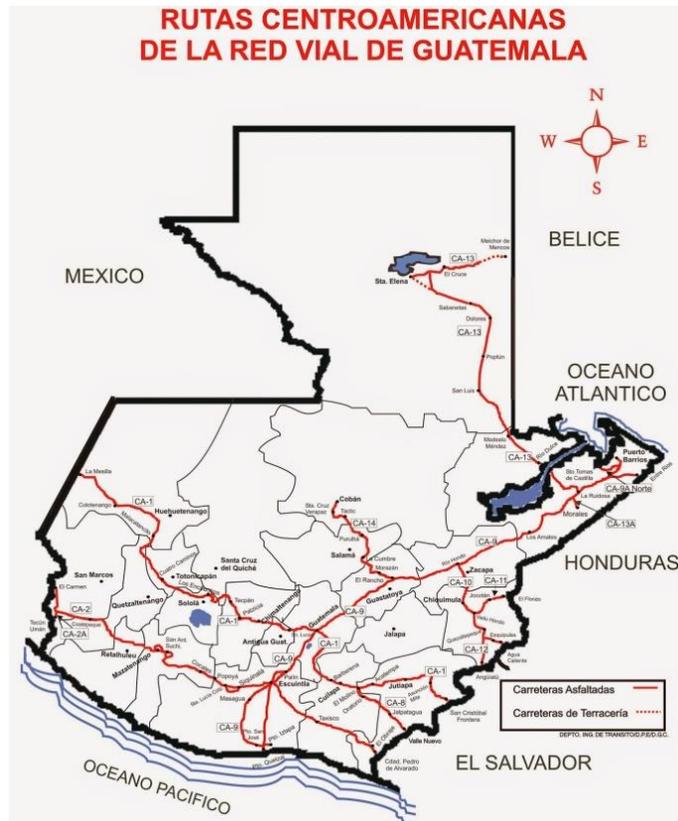
2.1. Clasificación de carreteras en Guatemala

La clasificación de la red vial, se realizó con fines específicos de realizar una mejor planificación y orientación de las inversiones aplicadas a las carreteras.

La red vial de la república de Guatemala, se divide en:

- Rutas centroamericanas (CA)
 - Unen la capital con fronteras o desde otra ruta centroamericana.
 - Unen puertos de importancia desde la capital o desde otra ruta centroamericana.
 - Atraviesan longitudinalmente o transversalmente la república.
 - Reúnen las mejores condiciones de diseño que la topografía les permite.
 - Derecho de vía: 25,00 mts. (12,50 mts. de cada lado de la línea central); área de reserva: 80,00 mts. (40,00 mts. de cada lado de la línea central).

Figura 1. Mapa de rutas centroamericanas

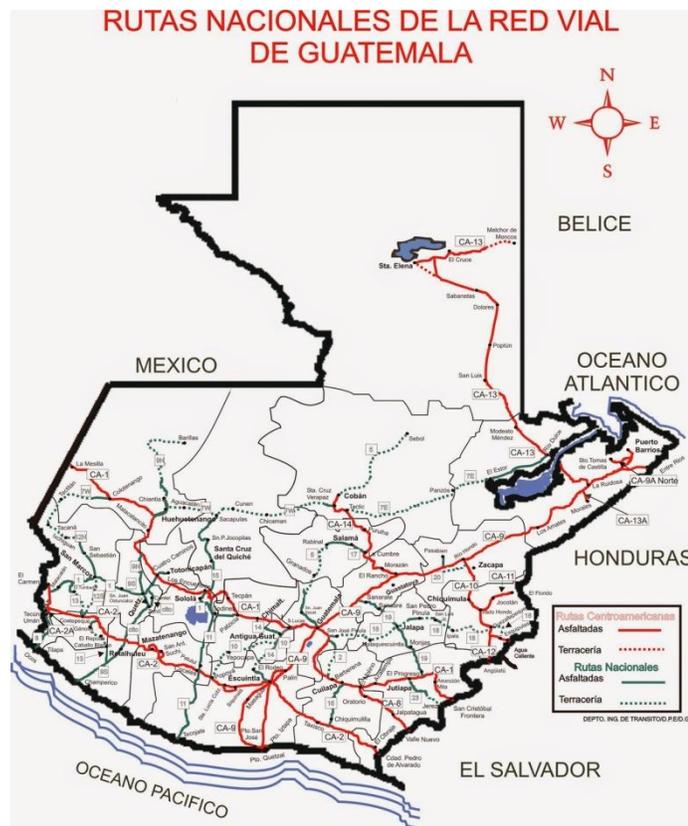


Fuente: Dirección General de Caminos, Departamento de Ingeniería de Tránsito.

- Rutas nacionales (RN)
 - Une cabeceras departamentales.
 - Une rutas centroamericanas, con cabeceras departamentales.
 - Conecta rutas centroamericanas.
 - Une rutas centroamericanas con puertos de importancia comercial para el país.

- Red auxiliar de las rutas centroamericanas.
- Derecho de vía: 25,00 mts. (12,50 mts. de cada lado de la línea central); área de reserva: 80,00 mts. (40,00 mts. de cada lado de la línea central).

Figura 2. Mapa de rutas nacionales



Fuente: Dirección General de Caminos, Departamento de Ingeniería de Tránsito.

- Rutas departamentales (RD)
 - Interconecta cabeceras departamentales.

- Unen cabeceras departamentales entre sí.
- Une cabeceras municipales con rutas centroamericanas o rutas nacionales u otras departamentales.
- Derecho de vía: 20,00 mts. (10,00 mts. de cada lado de la línea central).

Cada uno de los anteriores, son suficientes por si mismos para dar categoría de ruta departamental a una carretera.

- Une rutas nacionales (RN)
- Une rutas centroamericanas o nacionales con litorales
- Longitud mayor de 20 kms
- Tránsito diario mayor de 200 vehículos
- Importancia turística

De los anteriores, tiene que cumplir con dos criterios, por lo menos para ser ruta departamental.

- Caminos rurales (CR)
 - Interconectan a las comunidades rurales de los correspondientes municipios.

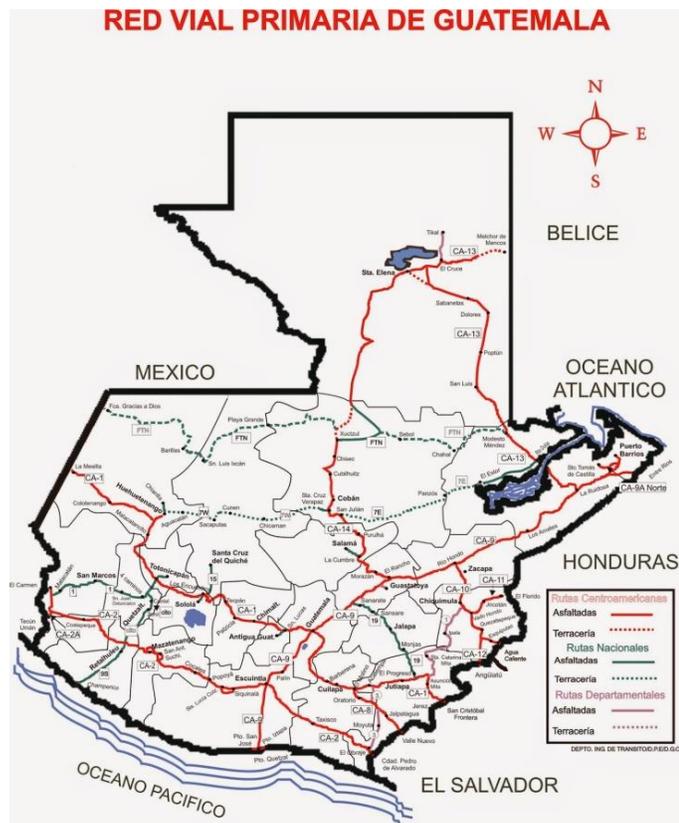
Se clasifican las rutas como primarias, secundarias y terciarias.

2.1.1. Carreteras de primer orden

Tiene como propósito el facilitar y fortalecer la comunicación directa a nivel macro regional, entre las Regiones, políticas continuas establecidas según decreto 70-86 (Ley preliminar de regionalización) e internacional al comunicar de y hacia los principales puertos marítimos y puertos fronterizos con los países vecinos, constituyendo la red básica de carreteras troncales o colaterales.

Actualmente la red vial primaria está conformada por las rutas centroamericanas (CA), tramos específicos de rutas nacionales (RN) y rutas departamentales (RD), así como la franja transversal del norte (FTN).

Figura 3. Mapa red vial primaria



Fuente: Dirección General de Caminos, Departamento de Ingeniería de Tránsito.

2.1.1.1. Tipo de tráfico

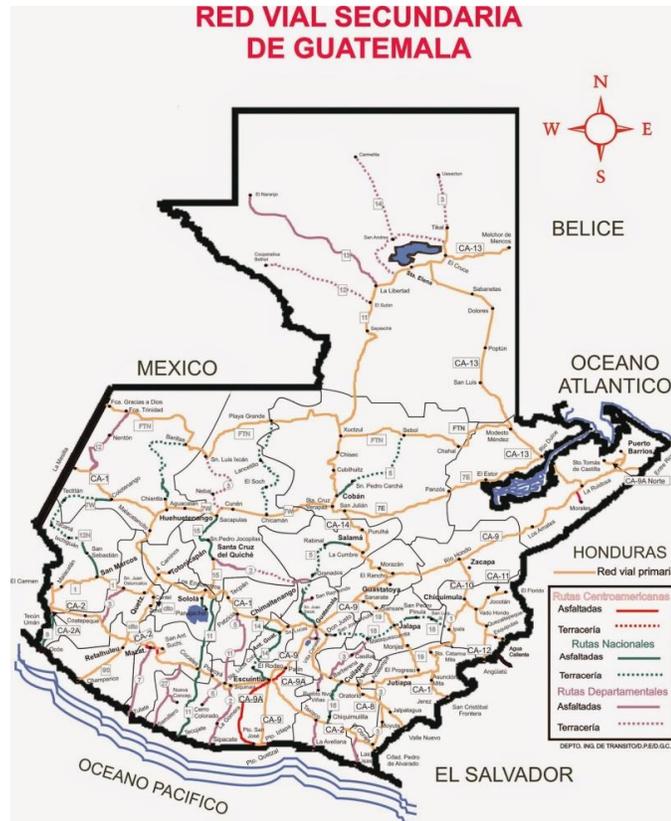
Estas carreteras son llamadas también calzadas y están diseñadas para un tráfico promedio diario de 3 000 a 5 000 vehículos.

- Liviano: automóviles para personas, *jeeps*, paneles.
- Buses: todos los buses que tienen eje simple doble en la parte de atrás.
- Carga liviana: *pick-ups*, carros acondicionados para cargas pequeñas.
- 2 ejes: Incluye todos los camiones con dos ejes, (ejes simple y simple doble).
- 3 ejes: Incluye todos los camiones con tres ejes, dos ejes doble rueda en la parte de atrás y eje simple adelante.
- 5 ejes: Incluye tractocamiones (furgones), dos parejas de dos ejes con doble llanta y eje simple adelante.

2.1.2. Carreteras de segundo orden

Su objetivo es completar la red vial primaria, facilitando la comunicación regional así como el proveer de una comunicación directa en lo posible entre las cabeceras de departamentos contiguos, orientadas a comunicar hacia y desde los mayores centros de población y / o producción conformando una red complementaria y / o alterna a la red vial primaria. La constituyen; rutas nacionales y tramos específicos de rutas departamentales.

Figura 4. Mapa red vial secundaria



Fuente: Dirección General de Caminos, Departamento de Ingeniería de Tránsito.

2.1.2.1. Tipo de tráfico

Están diseñadas para un tráfico promedio diario de 1 500 a 3 000 vehículos.

- Liviano: automóviles para personas, *jeeps*, paneles.
- Buses: todos los buses que tienen eje simple doble en la parte de atrás.
- Carga liviana: *pick-ups*, carros acondicionados para cargas pequeñas.

- 2 ejes: Incluye todos los camiones con dos ejes, (ejes simple y simple doble).
- 3 ejes: Incluye todos los camiones con tres ejes, dos ejes doble rueda en la parte de atrás y eje simple adelante.

2.1.3. Carreteras de tercer orden

Su propósito es el completar la red vial primaria y secundaria, proporcionando comunicación en la medida de lo posible entre cabeceras departamentales y sus respectivos municipios y aldeas. La misma está orientada a permitir el ingreso y egreso de insumos y servicios desde y hacia los centros de consumo y producción. La constituyen en su mayor parte caminos de terracería y / o balasto y caminos rurales.

2.1.3.1. Tipo de tráfico

Están diseñadas para un tráfico promedio diario de 900 a 1 500 vehículos.

- Liviano: automóviles para personas, *jeeps*, paneles.
- Buses: todos los buses que tienen eje simple doble en la parte de atrás.
- Carga liviana: *pick-ups*, carros acondicionados para cargas pequeñas.

2.2. Recomendaciones de cemento asfáltico a utilizar según su ubicación geográfica, tipo de transporte y carga vehicular

El tipo, grado, y especificación del cemento asfáltico o del cemento asfáltico modificado con polímeros a usar, debe ser uno de los establecidos en la tabla 401-11, según lo indiquen las Disposiciones Especiales.

Para el caso de asfaltos con clasificación PG, el grado se indicará en las Disposiciones Especiales de acuerdo con el rango comprendido entre el promedio de las temperaturas máximas durante los siete días más calurosos del año y la temperatura mínima donde se localice el proyecto, incrementando el valor de temperatura alta un grado de conformidad con el manual SP-2 del Instituto de Asfalto para Tránsito Lento y un grado adicional si el tránsito esperado excede un ESAL de 30×10^6 en el carril de diseño, pudiéndose fijar grados intermedios para los rangos de temperaturas indicados en la tabla 401 -11 o grados mayores que los indicados, cuando así se requiera.

Prácticamente la recomendación más importante para el diseño de una mezcla asfáltica en caliente, es el tipo de cemento asfáltico a utilizar. En Guatemala el mayor porcentaje de carreteras elaboradas con asfalto flexible para carreteras, se utiliza el cemento AC-20.

2.3. Cemento Portland tipo I (PM)

A continuación se presenta una breve definición y las propiedades que posee el cemento puzolánico tipo I (PM), el cual se utilizará como *filler* en la mezcla asfáltica del presente trabajo.

2.3.1. Definición

El cemento Portland modificado con puzolana tipo I (PM) es un cemento Portland adicionado, eso quiere decir que resulta de mezclar cemento Portland tipo I (puro) y una puzolana finamente molida durante el proceso de fabricación, pues este no es un cemento de mezclas manuales. En su calidad de Cemento hidráulico adicionado, este cemento es regido por la especificación ASTM C-595, como todos los cementos adicionados, ya sea con escoria de alto horno o puzolana, como en el caso de este cemento.

La norma lo clasifica como un cemento adicionado con 0 - 15 % de puzolana y para uso general en la construcción, pudiendo considerarse las opciones de moderada resistencia a los sulfatos, de aire incluido o de moderado calor de hidratación.

En la actualidad, los cementos adicionados con puzolana son prácticamente los únicos que se comercializan en Guatemala. Esto debido a que estos cementos han presentado ventajas que no se obtenían con el cemento Portland tipo I (Puro).

2.3.2. Propiedades del cemento puzolánico tipo I (PM)

La composición del cemento Portland modificado con puzolana tipo I (PM) es de la siguiente manera:

- 81 – 97 % de *clinker* Portland
- 1 – 15 % de puzolana
- 2 – 4 % de yeso

Las características físicas (que incluyen a las propiedades mecánicas, específicamente la resistencia a la compresión) del cemento Portland modificado con puzolana tipo I (PM) se determinan, al igual que el cemento Portland puro, mediante ensayos realizados en el polvo gris, en la pasta o en el mortero. Se explicó anteriormente que una pasta es la mezcla del cemento únicamente con agua y el mortero incluye una pasta con agregado fino.

Al igual que en el cemento Portland son características físicas básicas el peso específico o densidad que se define como la relación entre el peso o la masa y el volumen de espacio ocupado. Recordemos que peso específico no indica la calidad del cemento, pero se emplea en el control mezclas de concreto; sin embargo, un peso específico bajo indica que el cemento tiene adiciones. Una de las propiedades físicas más importantes del cemento es la finura, puesto que está relacionada directamente con la hidratación del mismo. Cuando el cemento es muy fino, endurece más rápido y por lo tanto desarrolla alta resistencia en menor tiempo.

2.3.3. Estabilizaciones con el cemento puzolánico tipo I (PM)

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, se ha estabilizado químicamente el suelo por medio de la incorporación de cemento puzolánico tipo I (PM) 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 cemento puzolánico tipo I (PM). Para determinar la cantidad de cemento

puzolánico tipo I (PM) necesario 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 cemento puzolánico tipo I (PM) utilizados comúnmente se encuentran entre un 2 a un 8 % del peso del material.

2.3.4. 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*.

2.3.4.1. 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 	

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. p. 401-7.

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.

2.3.5. Relleno mineral en 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.

2.3.5.1. 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 u otro producto preparado para este fin. Deberá ser introducido al tambor de mezcla en forma separada como un agregado más.

3. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

A continuación se presenta la descripción del diseño del experimento, para realizar un diseño de mezcla asfáltica por medio del método Marshall.

3.1. Diseño de mezcla asfáltica por el método Marshall

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.

3.1.1. 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*.

La mezcla de material pétreo y material bituminoso, debe llenar los requisitos del método de diseño establecido en las *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*, de la Dirección General de Caminos, según se muestra en la tabla II ó según corresponda, de conformidad con las Disposiciones Especiales.

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

MÉTODO DE DISEÑO⁽¹⁾	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 ⁽²⁾	75	75

Continuación de la tabla II.

Estabilidad	5 338 N (1 200 libras)	
Fluencia en 0,25 mm (0,01 pulg.)		
• Tránsito < 10 ⁶ ESAL	8	16
• Tránsito > 10 ⁶ ESAL	8	14
Relación estabilidad fluencia (lb/0,01 pulg)	120	275
Porcentaje de vacíos de la mezcla compactada ⁽³⁾	3	5
Porcentaje de vacíos en agregado mineral (VAM)	Ver tabla III	
Porcentaje de vacíos rellenos con asfalto		
• Tránsito < 10 ⁶ ESAL	65	78
• Tránsito > 10 ⁶ ESAL	65	75
Relación finos bitumen ⁽⁴⁾	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 %	

⁽¹⁾ El porcentaje de vacíos con aire se basa en AASHTO T 166, AASHTO T 209 y AASHTO T269.

⁽²⁾ Cuando se establezca en las Disposiciones Especiales, los especímenes podrán ser preparados usando el compactador giratorio aplicando las mismas especificaciones de compactación indicadas más adelante para mezclas Superpave.

⁽³⁾ Este valor deberá calcularse en función de la gravedad específica máxima de la mezcla compactada determinada directamente conforme el ensayo Rice-AASHTO T 209.

⁽⁴⁾ La razón polvo-asfalto se define como el porcentaje de material que pasa el tamiz de 75 micrómetros dividido por el contenido efectivo de asfalto calculado por masa de mezcla.

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes*. p. 401-7.

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

Tamaño Nominal Máximo del Agregado en mm	Porcentaje de Vacíos del Agregado Mineral (VAM)			
	Marshall			Superpave
	3% ⁽¹⁾	4% ⁽¹⁾	5% ⁽¹⁾	4% ⁽¹⁾
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	9,5	10,5	11,5	No aplicable

⁽¹⁾ Porcentaje de vacíos con aire de la mezcla compactada.

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes*. p. 401-8.

3.1.2. Procedimiento

Una mezcla asfáltica se puede presentar según su tamaño máximo, esta parte de la Norma ASTM D 3515, en donde se presentan los valores máximos y mínimos, de donde parte nuestra curva granulométrica de los agregados a utilizar en la mezcla.

Para diseñar una mezcla, se define como primer paso, cuál será el tamaño máximo de agregado que utilizaremos. Ya definido el tamaño de agregado, nos basamos en la tabla IV para conocer los valores de los porcentajes en masa que pasa la serie de tamices utilizados.

Posteriormente, el diseñador elige los valores de los porcentajes que pasa para cada tamiz, construyendo así la curva granulométrica, quedando definido así el diseño de mezcla asfáltica.

Para el estudio del presente trabajo, se ha elegido trabajar con una mezcla asfáltica tipo D, siendo el agregado máximo de ¾".

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

Tamaño del Tamiz (mm)	Porcentaje en Masa que Pasa el Tamiz designado (AASHTO T 27 y T11)					
	Graduación Designada y Tamaño Máximo Nominal ⁽¹⁾					
	A (50,8 mm)	B (38,1 mm)	C (25,4 mm)	D (19 mm)	E (12,5 mm)	F (9,5 mm)
	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	
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	28-58	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

⁽¹⁾El tamaño máximo nominal es el tamaño del tamiz mayor siguiente al tamaño del primer tamiz que retenga más del 10 % del agregado combinado. El máximo es el del tamiz mayor al correspondiente al tamaño máximo nominal.

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. p. 401-3.

En la tabla V se presentan los valores propuestos de porcentaje en masa que pasa cada tamiz, dichos valores representan el diseño de mezcla asfáltica con lo cual se llevarán a cabo los diferentes estudios de este trabajo.

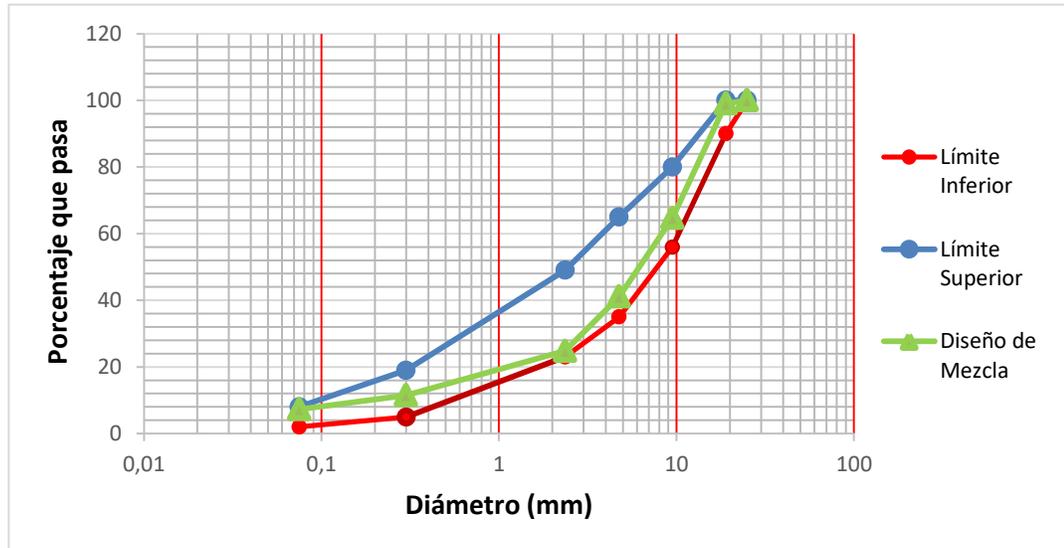
Cada mezcla asfáltica debe de contener un peso total de 1 200 g. de agregados pétreos.

Tabla V. Diseño de mezcla asfáltica

No. TAMIZ	ABERTURA (mm)	1"	3/8"	#4	#4-0	DISEÑO
		PORCENTAJE QUE PASA (0,05)	PORCENTAJE QUE PASA (0,38)	PORCENTAJE QUE PASA (0,1)	PORCENTAJE QUE PASA (0,47)	
1"	25	100				100
3/4"	19	81,56	100	100	100	99,08
3/8"	9,5	2,54	22,36	99,84	98,07	64,70
#4	4,75	0,93	1,76	34,80	78,56	41,12
#8	2,36	0,93	1,72	7,38	49,74	24,81
#50	0,3	0,90	1,65	3,78	22,19	11,48
#200	0,075	0,82	1,53	3,18	13,51	7,29

Fuente: elaboración propia.

Figura 5. **Curva granulométrica del diseño de mezcla asfáltica**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

3.2. 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.

3.2.1. Metodología

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

- INV E748: estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall.

Equipo a utilizar:

- 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 en 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 de estar firmemente sujeta al pedestal.
- Dispositivo con resorte de tensión, diseñado para centrar rígidamente el molde de compactación sobre el pedestal. Debe de sostener en su posición el molde, el collar y la placa de base durante la compactación de la probeta.

Figura 6. **Equipo utilizado para calentar agregados, cemento asfáltico**



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

Figura 7. **Equipo utilizado para calentar mezcla asfáltica y medición de temperatura**



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

Figura 8. **Pedestal de compactación y termómetro para medición de temperatura**



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

Figura 9. **Equipo de medición de material para mezcla asfáltica**



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

3.2.2. Procedimiento

Para la elaboración de probetas de mezclas asfálticas, se muestra a continuación los pasos:

- 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.
- Secar los agregados y separar por tamizado en fracciones de diferentes tamaños.
- 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).
- 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.
- 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.

- Verter la cantidad requerida de cemento asfáltico en la mezcla de agregados.
- 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.
- 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.
- Secar y armar el conjunto de moldeo de las probetas, aplicándole previamente aceite para desencofrar.
- 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.
- 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.
- 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.

- 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.

3.3. Preparación de probetas con adición de cemento puzolánico tipo I (PM)

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

3.3.1. Metodología

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

- INV E748: estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall.

3.3.2. Procedimiento

En el procedimiento para la realización de las probetas de mezclas asfálticas modificadas, se utilizarán las mismas cantidades de tamaños de agregados con los que se realizó la mezcla asfáltica tradicional, con la diferencia que una parte del relleno mineral es sustituido por cemento Puzolánico tipo I (PM), es decir al peso de agregado del tamiz # 4-0 que utilizamos en el diseño de mezcla tradicional, se le resta el peso de cemento Puzolánico tipo I (PM) que corresponde al 2 % del peso total de la mezcla de agregados.

Por consiguiente, la mezcla asfáltica modificada estará constituida en la parte del relleno mineral, de polvo de roca proveniente del agregado pétreo, como también de cemento Puzolánico tipo I (PM). Posteriormente se realizan los pasos descritos en el numeral 3.2.2

3.4. 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.

3.4.1. 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*.

Equipo a utilizar:

- 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 10. **Balanza provista de dispositivo de suspensión**



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

Figura 11. **Pileta de agua para suspensión de probeta**



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

3.4.2. Procedimiento

- Determinar la masa del espécimen seco, pesándolo después de que haya permanecido al menos durante 1 hora a temperatura ambiente.
- Sumergir la muestra en un baño de agua a temperatura ambiente durante 5 minutos.
- Sacar y secar superficialmente la muestra para posteriormente pesarla y obtener el peso saturado.
- Sumergir la muestra en un baño de agua a temperatura ambiente, se pesa estando suspendida en el agua.

- 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 *bulk* de briquetas

A= masa seca del espécimen (g)

B= masa seca saturada del espécimen (g)

C= masa del espécimen sumergido (g)

3.5. Gravedad específica teórica máxima

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

3.5.1. 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 12. **Bomba de vacío, picnómetro para vacío y dispositivo de agitación. Dispositivo para atrapar el vapor de agua y manómetro de presión residual**



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

3.5.2. Procedimiento

- 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 de ser mayores de 6 mm.
- 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).

- 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.
- 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 psi. 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.
- Una vez transcuridos los 15 minutos, liberar gradualmente la presión de vacío usando la válvula de purga.
- 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 más la placa, más la muestra, más agua.
- Calcular la gravedad específica teórica máxima por medio de la siguiente expresión:

$$G_{mm} = \frac{A}{A + D - E}$$

Donde:

G_{mm} = 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 agua (g)

3.6. Porcentaje de vacíos-densidad

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

3.6.1. 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*.

3.6.2. Procedimiento

- Determinar la gravedad específica *bulk* de la mezcla compactada, por medio del procedimiento descrito anteriormente.
- Determinar la gravedad específica teórica máxima de la mezcla suelta, por medio del procedimiento descrito anteriormente.
- Calcular el porcentaje de vacíos con aire en la mezcla asfáltica, por medio de la siguiente expresión:

$$V_A = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \times 100$$

Donde:

V_A = porcentaje de vacíos

G_{mm} = gravedad específica teórica máxima

G_{mb} = gravedad específica bruta

3.7. Prueba de estabilidad-flujo Marshall

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

3.7.1. 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*.

Equipo a utilizar:

- 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 13. **Anillo dinamométrico y deformímetro de lectura fija**



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

Figura 14. **Recipiente con control termostático**



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

3.7.2. Procedimiento

El ensayo se debe realizar dentro de las 24 horas siguientes a la compactación de las probetas.

- Colocar las probetas en el baño de agua durante 45 minutos, manteniendo una temperatura constante de 60 °C.
- Antes de colocar las probetas, limpiar perfectamente las barras guías y las superficies interiores de las mordazas de ensayo.
- 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.

- 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.
- Anotar el valor de carga leído en el anillo dinamométrico y el valor de la deformación leído en el deformímetro.
- 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).
- 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).

3.8. 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.

3.8.1. 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.

3.8.2. Procedimiento

- 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)

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1. Resultados de los ensayos

Se presentan los datos y los respectivos cálculos con los resultados, de cada ensayo descrito anteriormente.

4.1.1. Gravedad específica, *bulk*

A continuación, se presentan los datos y cálculos respectivos de la determinación de los resultados del ensayo de gravedad específica, *bulk*.

Ejemplo de cálculo:

Datos:

Probeta 1 = 4 % de bitumen, diseño tradicional

$$A = 1\,232,23 \text{ g}$$

$$B = 1\,248,76 \text{ g}$$

$$C = 725,30 \text{ g}$$

$$G_{mb} = \frac{1\,232,23}{1\,248,76 - 725,30} = 2,354$$

4.1.1.1. Resultados

Los resultados obtenidos del ensayo son los siguientes:

Tabla VI. **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	1 232,23	1 248,76	725,30	2,35	2,36
	2	1 232,78	1 244,26	725,10	2,37	
	3	1 241,74	1 252,03	742,65	2,44	
4,5	1	1 235,16	1 255,50	733,10	2,36	2,37
	2	1 251,63	1 264,86	737,10	2,37	
	3	1 244,58	1 262,15	731,47	2,35	
5	1	1 236,43	1 254,24	735,10	2,38	2,37
	2	1 244,77	1 252,15	737,57	2,42	
	3	1 247,40	1 262,13	735,40	2,37	
5,5	1	1 255,14	1 271,48	728,00	2,31	2,42
	2	1 251,18	1 256,49	740,10	2,42	
	3	1 251,26	1 256,59	739,17	2,42	
6	1	1 249,98	1 254,90	743,53	2,44	2,44
	2	1 262,12	1 266,77	741,79	2,40	
	3	1 268,34	1 272,09	752,56	2,44	

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **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	1 245,83	1 270,19	737,30	2,338	2,34
	2	1 230,65	1 256,00	729,33	2,337	
	3	1 238,88	1 261,28	740,48	2,379	
4,5	1	1 241,09	1 255,24	735,05	2,386	2,35
	2	1 241,26	1 258,71	730,40	2,349	
	3	1 241,97	1 258,44	730,85	2,354	
5	1	1 230,38	1 246,27	727,29	2,371	2,37
	2	1 253,24	1 271,03	732,30	2,326	
	3	1 249,06	1 265,74	736,83	2,362	
5,5	1	1 255,69	1 260,98	733,00	2,378	2,37
	2	1 251,95	1 261,51	731,33	2,361	
	3	1 209,77	1 233,72	711,17	2,315	
6	1	1 245,14	1 248,78	735,26	2,425	2,40
	2	1 173,76	1 183,05	695,33	2,407	
	3	1 267,53	1 272,27	743,37	2,397	

Fuente: elaboración propia.

Nota: de las tres probetas ensayadas para cada uno de los porcentajes de cemento asfáltico, se tomaron en cuenta dos de las gravedades más representativas para promediarlo y obtener los valores que representan la G_{mb}.

4.1.2. Gravedad específica teórica máxima

A continuación, se presentan los datos y cálculos respectivos de la determinación de los resultados del ensayo de gravedad específica teórica máxima.

Ejemplo de cálculo:

Datos:

4 % de bitumen, diseño tradicional

$$A = 1\,231,50 \text{ g}$$

$$D = 7\,379,90 \text{ g}$$

$$E = 8\,152,20 \text{ g}$$

$$G_{mb} = \frac{1\,231,50}{1\,231,50 + 7\,379,90 - 8\,152,20} = 2,682$$

4.1.2.1. Resultados

Los resultados obtenidos del ensayo son los siguientes:

Tabla VIII. **Resultados de gravedad específica teórica máxima (mezcla tradicional)**

Porcentaje de cemento asfáltico	Probeta	A (g)	D (g)	E (g)	Gmm
4,00	Mezcla tradicional	1 231,50	7 379,90	8 152,20	2,68

Continuación de la tabla VIII.

4,50	Mezcla tradicional	1 249,90	7 377,80	8 154,20	2,64
5,00	Mezcla tradicional	1 235,80	7 380,00	8 143,00	2,61
5,50	Mezcla tradicional	1 251,20	7 381,40	8 141,30	2,55
6,00	Mezcla tradicional	1 253,80	7 379,60	8 138,00	2,53

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Resultados de gravedad específica teórica máxima (mezcla modificada)**

Porcentaje de cemento asfáltico	Probeta	A (g)	D (g)	E (g)	Gmm
4,00	Mezcla modificada	1 249,20	7 380,90	8 155,10	2,63
4,50	Mezcla modificada	1 243,60	7 379,40	8 145,50	2,60
5,00	Mezcla modificada	1 220,30	7 380,90	8 132,00	2,60
5,50	Mezcla modificada	1 255,30	7 381,80	8 149,10	2,57
6,00	Mezcla modificada	1 255,40	7 382,20	8 144,90	2,55

Fuente: elaboración propia.

4.1.3. Porcentaje de vacíos-densidad

A continuación, se presentan los datos y cálculos respectivos de la determinación de los resultados del ensayo de porcentaje de vacíos-densidad de la mezcla asfáltica.

Ejemplo de cálculo:

Datos:

4 % de bitumen, diseño tradicional

$$G_{mm} = 2,68$$

$$G_{mb} = 2,36$$

$$V_A = \frac{2,68 - 2,36}{2,68} \times 100 = 12,22 \%$$

4.1.3.1. Resultados

Los resultados obtenidos del ensayo son los siguientes:

Tabla X. **Resultados de porcentaje de vacíos-densidad (mezcla tradicional)**

Porcentaje de cemento asfáltico	Probeta	Gmm	Gmb	VA (%)
4,00	Mezcla tradicional	2,68	2,36	11,84

Continuación de la tabla X.

4,50	Mezcla tradicional	2,64	2,37	10,29
5,00	Mezcla tradicional	2,61	2,37	9,14
5,50	Mezcla tradicional	2,55	2,42	4,95
6,00	Mezcla tradicional	2,53	2,44	3,48

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Resultados de porcentaje de vacíos-densidad (mezcla modificada)**

Porcentaje de cemento asfáltico	Probeta	Gmm	Gmb	VA (%)
4,00	Mezcla modificada	2,63	2,34	11,13
4,50	Mezcla modificada	2,60	2,35	9,70
5,00	Mezcla modificada	2,60	2,37	9,02
5,50	Mezcla modificada	2,57	2,37	7,87
6,00	Mezcla modificada	2,55	2,40	5,75

Fuente: elaboración propia.

4.1.4. Prueba de estabilidad-flujo Marshall

A continuación, se presentan los datos y cálculos respectivos de la determinación de los resultados del ensayo de estabilidad-flujo Marshall.

Ejemplo de cálculo:

Datos:

Probeta 2 = 4 % bitumen, diseño tradicional

Lectura anillo dinamométrico: 320 delft

Con respecto al valor obtenido en el anillo dinamométrico, se utiliza la tabla de corrección de estabilidad Marshall (ver apéndice 1), para obtener el valor de estabilidad en libras-fuerza que corresponda.

$$245 \text{ delft} = 3\,030,21 \text{ lbf}$$

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

$$\text{Volumen} = B - C$$

$$\text{Volumen} = 1\,244,26 - 725,10 = 519,16 \text{ cm}^3$$

Para el volumen de $519,16 \text{ cm}^3$ equivale un factor de corrección de 1,00. Por lo tanto el valor de estabilidad corregido sería:

$$\text{Estabilidad} = (3\,030,21)(1,00) = 3\,030,21 \text{ lbf}$$

4.1.4.1. Resultados

Los resultados obtenidos del ensayo son los siguientes:

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

Porcentaje de cemento asfáltico	Probeta	Flujo (0,01")	Carga (delft)	Estabilidad (lbf)	Factor de corrección (lbf)	Estabilidad corregida (lbf)
4,00	1	9	245	2 323,58	1,00	2 323,58
	2	8	320	3 030,21	1,00	3 030,21
4,50	1	11	163	1 548,27	0,96	1 486,34
	2	13	233	2 210,30	0,96	2 121,89
5,00	1	14	210	1 993,51	0,96	1 913,77
	2	14	126	1 197,81	0,96	1 149,90
5,50	1	15	233	2 210,30	1,00	2 210,30
	2	16	180	1 709,33	1,00	1 709,33
6,00	1	16	170	1 615,03	1,00	1 615,03
	2	20	201	1 908,39	0,96	1 832,05

Fuente: elaboración propia.

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

Porcentaje de cemento asfáltico	Probeta	Flujo (0,01")	Carga (delft)	Estabilidad (lbf)	Factor de corrección (lbf)	Estabilidad corregida (lbf)
4,00	1	12	250	2 370,73	0,96	2 275,90
	2	10	165	1 567,40	1,00	1 567,40
4,50	1	10	190	1 803,64	0,96	1 731,49
	2	17	206	1 955,54	0,96	1 877,32
5,00	1	15	160	1 519,78	0,96	1 458,99
	2	15	141	1 340,20	0,96	1 286,59
5,50	1	18	160	1 519,78	0,96	1 458,99
	2	19	207	1 965,03	0,96	1 886,43
6,00	1	15	154	1 463,13	1,04	1 521,66
	2	16	165	1 567,40	0,96	1 504,70

Fuente: elaboración propia.

4.1.5. Porcentaje de humedad

A continuación, se presentan los datos y cálculos respectivos de la determinación de los resultados del ensayo de contenido de humedad presente en la mezcla compactada.

Ejemplo de cálculo:

Datos:

Probeta 1 = 4 % de bitumen, diseño tradicional

$$A = 1\,232,23 \text{ g}$$

$$B = 1\,248,76 \text{ g}$$

$$C = 725,30 \text{ g}$$

$$\% H = \frac{1\,248,76 - 1\,232,23}{1\,248,76 - 725,30} \times 100 = 3,16$$

4.1.5.1. Resultados

Los resultados obtenidos del ensayo son los siguientes:

Tabla XIV. **Resultados de porcentajes de humedad (mezcla tradicional)**

Porcentaje de cemento asfáltico	Probeta	A (g)	B (g)	C (g)	% H	% H promedio
4	1	1 232,23	1 248,76	725,30	3,16	2,12
	2	1 232,78	1 244,26	725,10	2,21	
	3	1 241,74	1 252,03	742,65	2,02	
4,5	1	1 235,16	1 255,50	733,10	3,89	2,91
	2	1 251,63	1 264,86	737,10	2,51	
	3	1 244,58	1 262,15	731,47	3,31	
5	1	1 236,43	1 254,24	735,10	3,43	2,12
	2	1 244,77	1 252,15	737,57	1,43	
	3	1 247,40	1 262,13	735,40	2,80	
5,5	1	1 255,14	1 271,48	728,00	3,01	1,03
	2	1 251,18	1 256,49	740,10	1,03	
	3	1 251,26	1 256,59	739,17	1,03	

Continuación de la tabla XIV.

6	1	1 249,98	1 254,90	743,53	0,96	0,80
	2	1 262,12	1 266,77	741,79	0,89	
	3	1 268,34	1 272,09	752,56	0,72	

Fuente: elaboración propia.

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

Porcentaje de cemento asfáltico	Probeta	A (g)	B (g)	C (g)	% H	% H promedio
4	1	1 245,83	1 270,19	737,30	4,57	4,44
	2	1 230,65	1 256,00	729,33	4,81	
	3	1 238,88	1 261,28	740,48	4,30	
4,5	1	1 241,09	1 255,24	735,05	2,72	2,92
	2	1 241,26	1 258,71	730,40	3,30	
	3	1 241,97	1 258,44	730,85	3,12	
5	1	1 230,38	1 246,27	727,29	3,06	3,11
	2	1 253,24	1 271,03	732,30	3,30	
	3	1 249,06	1 265,74	736,83	3,15	
5,5	1	1 255,69	1 260,98	733,00	1,00	1,40
	2	1 251,95	1 261,51	731,33	1,80	
	3	1 209,77	1 233,72	711,17	4,58	

Continuación de la tabla XV.

6	1	1 245,14	1 248,78	735,26	0,71	0,80
	2	1 173,76	1 183,05	695,33	1,90	
	3	1 267,53	1 272,27	743,37	0,90	

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.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

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

5.1. Tabulación de resultados

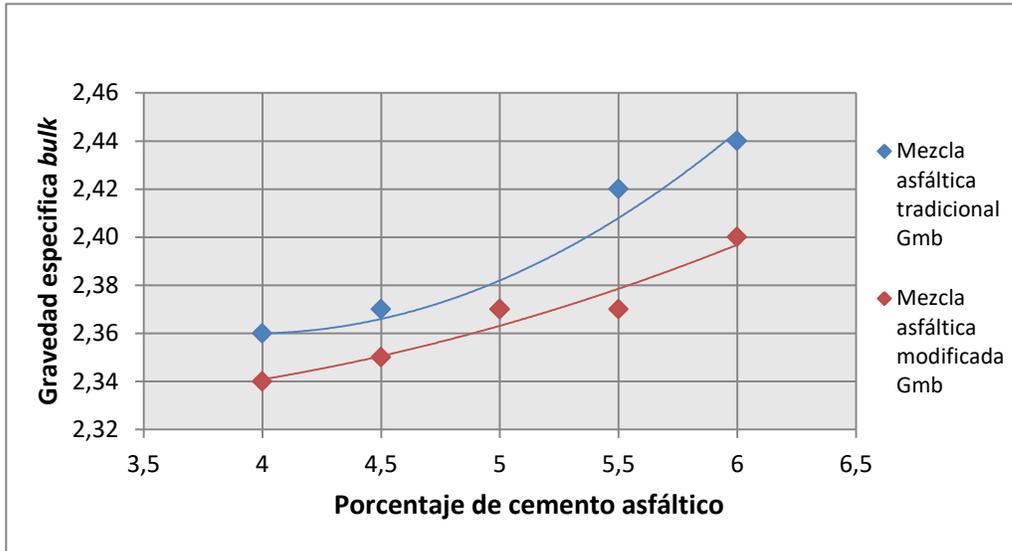
A continuación, en las tablas siguientes se presenta un cuadro resumen de los resultados correspondientes a cada uno de los ensayos realizados.

Tabla XVI. **Cuadro comparativo de gravedad específica *bulk***

Porcentaje de cemento asfáltico	Mezcla asfáltica tradicional G_{mb}	Mezcla asfáltica modificada G_{mb}	Variación	
			Absoluta	Relativa (%)
4	2,36	2,34	0,02	0,85
4,5	2,37	2,35	0,02	0,84
5	2,37	2,37	0,00	0,00
5,5	2,42	2,37	0,05	2,07
6	2,44	2,40	0,04	1,64

Fuente: elaboración propia.

Figura 15. Gráfico de gravedad específica *bulk*



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

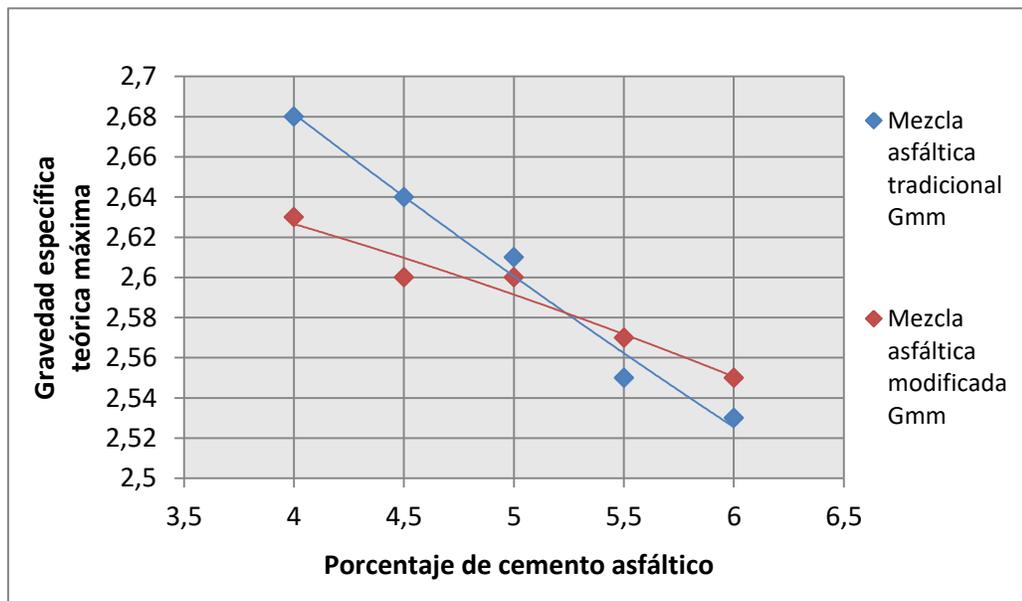
La gráfica nos indica los resultados obtenidos, en donde podemos observar la variación y comparar las dos mezclas asfálticas; el cemento puzolánico es más pesado esto hace que las probetas compactadas bajen el volumen de la relación de finos y bitumen, por lo cual su peso disminuye respecto a la mezcla sin modificar.

Tabla XVII. Cuadro comparativo de gravedad específica teórica máxima

Porcentaje de cemento asfáltico	Mezcla asfáltica tradicional G_{mm}	Mezcla asfáltica modificada G_{mm}	Variación	
			Absoluta	Relativa (%)
4	2,68	2,63	0,05	1,87
4,5	2,64	2,60	0,04	1,52
5	2,61	2,60	0,01	0,38
5,5	2,55	2,57	0,02	0,78
6	2,53	2,55	0,02	0,79

Fuente: elaboración propia.

Figura 16. Gráfico de gravedad específica teórica máxima



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

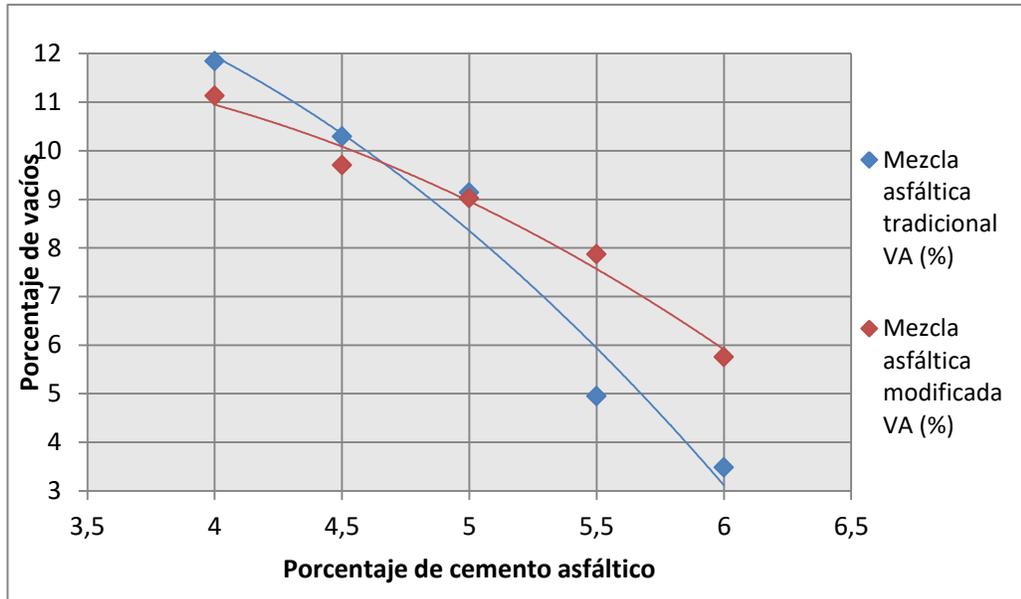
La gravedad teórica máxima tuvo un comportamiento más estable en la mezcla que utilizó cemento puzolánico, su rango de variación fue menor, esto debido a la menor cantidad de finos utilizado al sustituir el filler de la granulometría con cemento puzolánico.

Tabla XVIII. Cuadro comparativo de porcentaje de vacíos-densidad

Porcentaje de cemento asfáltico	Mezcla asfáltica tradicional VA (%)	Mezcla asfáltica modificada VA (%)	Variación	
			Absoluta	Relativa (%)
4	11,84	11,13	0,71	6,00
4,5	10,29	9,70	0,59	5,73
5	9,14	9,02	0,12	1,31
5,5	4,95	7,87	2,92	58,99
6	3,48	5,75	2,27	65,23

Fuente: elaboración propia.

Figura 17. Gráfico de porcentaje de vacíos-densidad



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

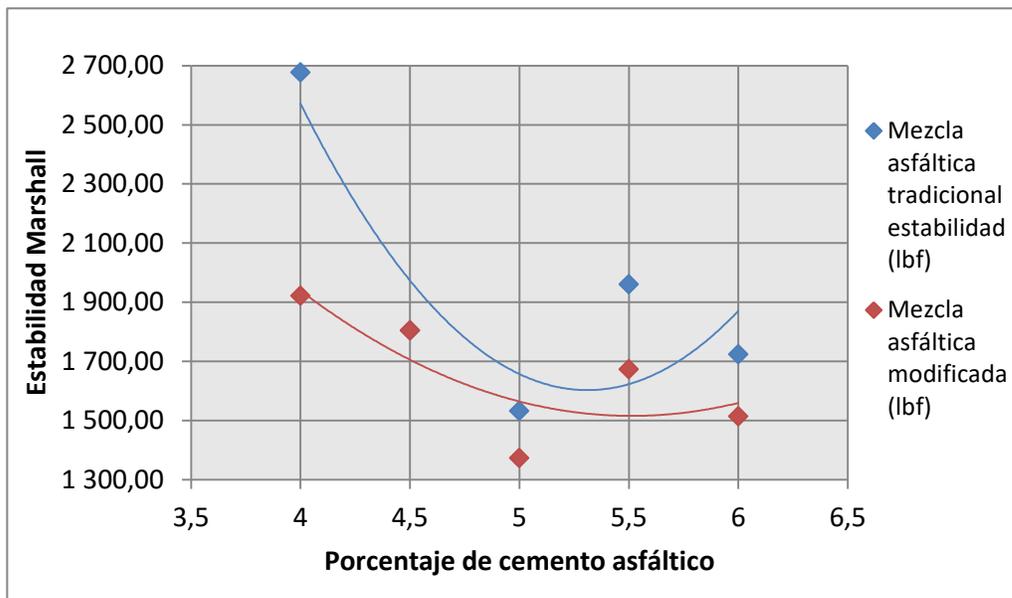
La mezcla asfáltica sin modificar llenó los requerimientos de los vacíos, pero la modificada con cemento puzolánico no, al ser más pesado el cemento que el filler utilizado en la granulometría inicial, el volumen disminuye, por lo cual hace que el *mastic* sea menor para recubrir los agregados y el porcentaje de vacíos aumente en la mezcla modificada. En la gráfica se observa que no llega a los valores necesarios para poder ser utilizada.

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

Porcentaje de cemento asfáltico	Mezcla asfáltica tradicional estabilidad (lbf)	Mezcla asfáltica modificada (lbf)	Variación	
			Absoluta	Relativa (%)
4	2 676,90	1 921,65	755,25	28,21
4,5	1 804,11	1 804,41	0,30	0,02
5	1 531,83	1 372,79	159,04	10,38
5,5	1 959,82	1 672,71	287,11	14,65
6	1 723,54	1 513,18	210,36	12,21

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Gráfico de estabilidad Marshall**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

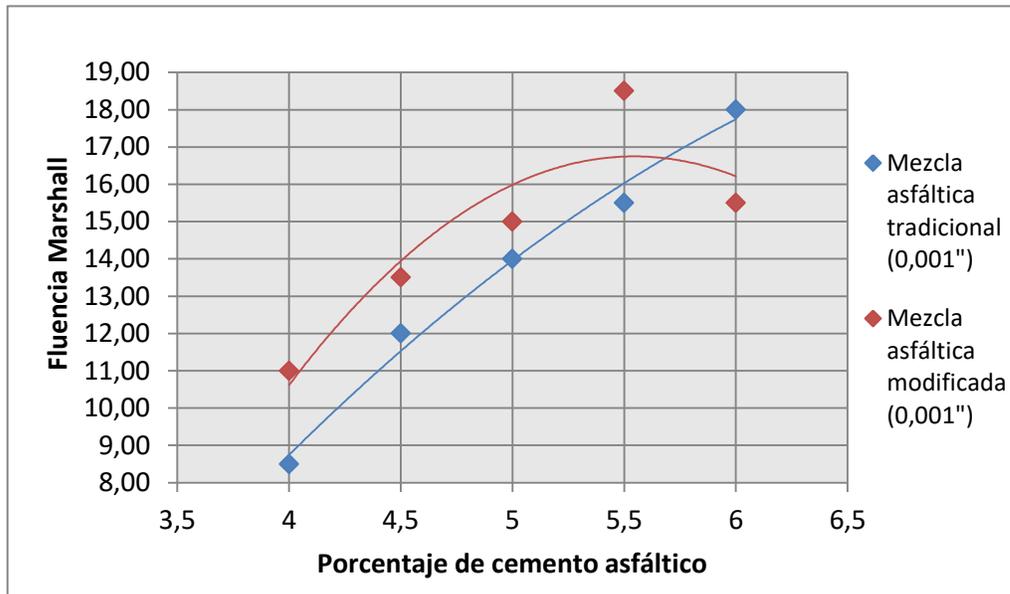
Con relación a la gráfica de vacíos, en el cual el *mastic* disminuyó, la gráfica de estabilidad también se ve afectada, ya que entre menos relación finos/bitumen se encuentre presente en la mezcla asfáltica, también la estabilidad disminuirá, esto se ve reflejado en la gráfica de la mezcla modificada. Los dos diseños están por arriba del valor especificado que es de 1 200 lbf.

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

Porcentaje de cemento asfáltico	Mezcla asfáltica tradicional (0,001")	Mezcla asfáltica modificada (0,001")	Variación	
			Absoluta	Relativa (%)
4	8,50	11,00	2,50	29,41
4,5	12,00	13,50	1,50	12,50
5	14,00	15,00	1,00	7,14
5,5	15,50	18,50	3,00	19,35
6	18,00	15,50	2,50	13,89

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. Gráfico de flujo Marshall



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

La deformación de las mezclas asfálticas se relaciona directamente con la cantidad de finos y cemento asfáltico que esté presente en el diseño; de nuevo el poco volumen del cemento hizo que la estabilidad fuera menor, en esta grafica los dos diseños cumplen perfectamente las especificaciones.

Tabla XXI. Cuadro comparativo de relación estabilidad-fluencia

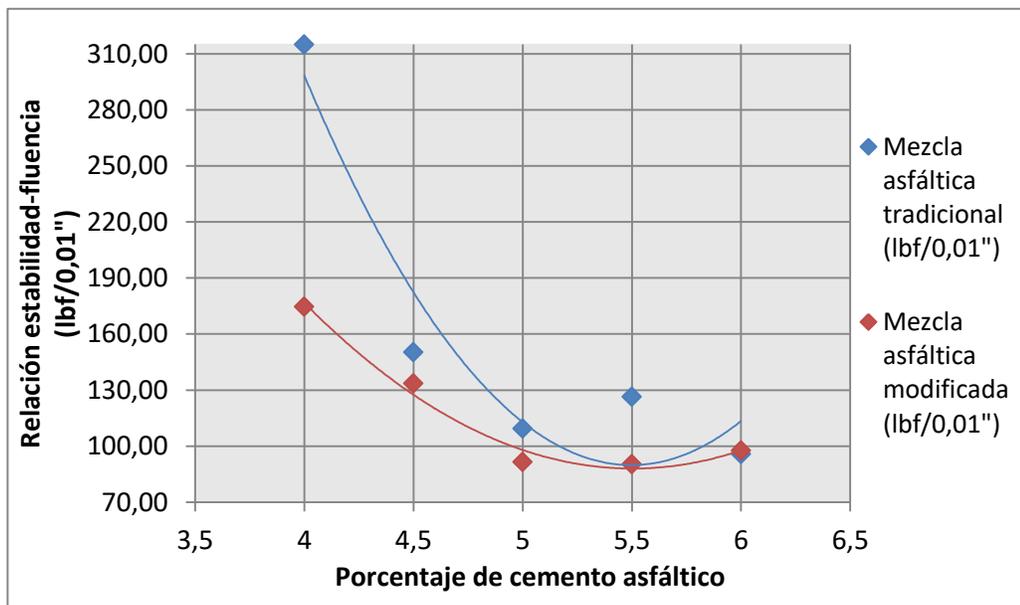
Porcentaje de cemento asfáltico	Mezcla asfáltica tradicional (lbf/0,01")	Mezcla asfáltica modificada (lbf/0,01")	Variación	
			Absoluta	Relativa (%)
4	314,93	174,70	140,23	44,53

Continuación de la tabla XXI.

4,5	150,34	133,66	16,68	11,10
5	109,42	91,52	17,90	16,36
5,5	126,44	90,42	36,02	28,49
6	95,75	97,62	1,87	1,96

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Gráfico de relación estabilidad-fluencia**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

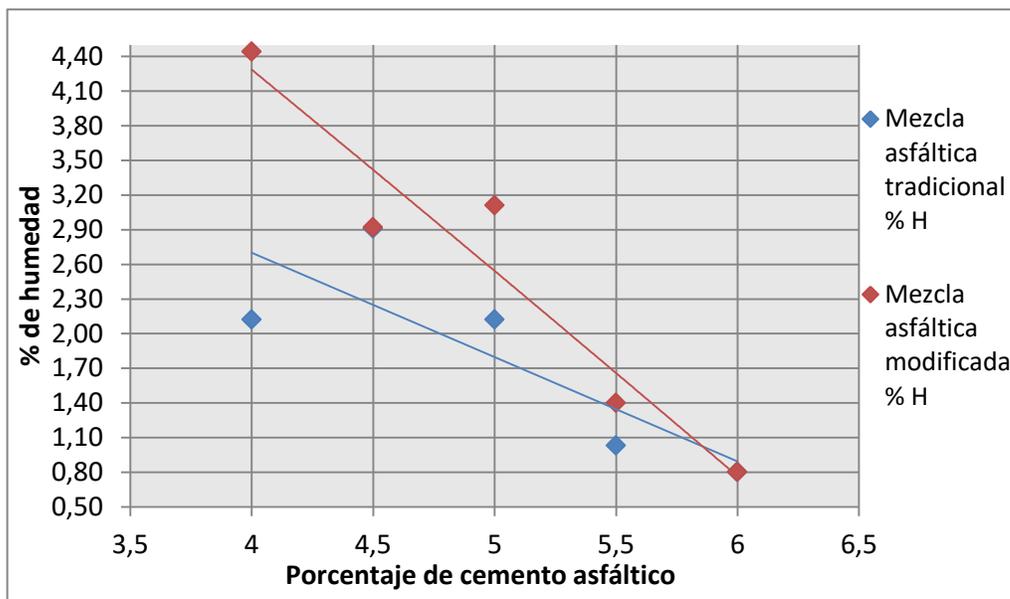
La relación estabilidad / fluencia se ve afectada por el filler utilizado en el diseño de las mezclas asfálticas, en esta grafica se puede notar que el diseño más estable y que cumple en amplio margen las especificaciones es el diseño sin modificar; el diseño modificado debido al poco filler se ve afectado en su baja estabilidad por lo que cumple pero solo en la parte inicial de diseño.

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

Porcentaje de cemento asfáltico	Mezcla asfáltica tradicional % H	Mezcla asfáltica modificada % H	Variación	
			Absoluta	Relativa (%)
4	2,12	4,44	2,32	109,43
4,5	2,91	2,92	0,01	0,34
5	2,12	3,11	0,99	46,70
5,5	1,03	1,40	0,37	35,92
6	0,80	0,80	0,00	0,00

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Gráfico de porcentaje de humedad**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

La humedad disminuye al aumentar la cantidad de cemento asfáltico, esta propiedad aumento con la mezcla modificada, pero al aumentar la cantidad de cemento asfáltico ambas se comportaron de la misma manera.

5.2. Beneficios del uso del cemento puzolánico tipo I (PM) en mezcla asfáltica en comparación con una mezcla asfáltica tradicional

Cabe mencionar que para el presente trabajo, el cemento puzolánico tipo I (PM), fue sustituido por el filler de la granulometría en una cantidad del 2 % del peso total de la mezcla de agregados.

Así como también tomar en cuenta que, para los beneficios del uso del cemento puzolánico tipo I (PM) en una mezcla asfáltica, obtenidos en el presente trabajo se realizó con una propuesta de un tipo de granulometría a utilizar, un rango de porcentaje de cemento asfáltico, siendo del 4 al 6 % y se utilizó un cemento asfáltico tipo AC-20.

Basado en los resultados obtenidos de los diferentes ensayos realizados en laboratorio, utilizando cemento puzolanico tipo I (PM) como filler en el diseño de mezcla asfáltica, los beneficios son prácticamente nulos, esto con base a los diferentes límites que se establecen en la sección 401 de las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos, para cada uno de los ensayos realizados.

En general, para tener los mayores beneficios de tener el cemento puzolánico como filler en mezclas asfálticas, se debe de tener en cuenta las condiciones de calidad de tales mezclas, entre las cuales podemos mencionar: la estabilidad, la flexibilidad y durabilidad, en las cuales el cemento pueda

cumplir con las funciones necesarias para actuar como filler dentro de una mezcla asfáltica.

También podemos tomar en cuenta que el cemento puzolánico se puede utilizar como material de relleno de vacíos, como espesante de asfalto o mejorando la adherencia del par agregado, esto realizando los ensayos necesarios para cumplir con la norma ASTM D1559 y de las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos.

5.3. Cantidad óptima de cemento puzolánico tipo I (PM) en mezcla asfáltica

Se analiza que el contenido óptimo de cemento asfáltico para este diseño, no es determinable, ya que el análisis en base a los resultados obtenidos no se encuentra dentro de los límites estipulados de las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos, mediante los diferentes ensayos de laboratorio regidos por la norma ASTM D1559.

En donde, de dicha norma, podremos determinar la densidad *bulk* y el porcentaje de vacíos para cada serie de muestras asfálticas, mediante el cálculo y análisis de los diferentes pesos y volúmenes.

El análisis para el presente trabajo, nos muestra que utilizando el 2 % del peso total de la mezcla de agregados, de cemento puzolánico, en combinación de una granulometría propuesta y la utilización de un cemento asfáltico tipo AC-20, no resultó con mayores beneficios.

Podemos llegar a decir que la cantidad óptima de cemento puzolánico tipo I (PM) en mezclas asfálticas, es única para cada diseño propuesto, esto dependiendo de la combinación de agregados, el tipo y la cantidad de cemento asfáltico que se pueda llegar a realizar.

CONCLUSIONES

1. Con base a los resultados obtenidos, empleando la metodología de Marshall con las especificaciones que establece la norma ASTM D1559, el desempeño del diseño de mezcla asfáltica propuesto con cemento puzolánico tipo I (PM) donde se sustituyó el filler por cemento, no es óptimo, porque los parámetros, tales como el porcentaje de vacíos, la carga y deformación, están fuera de los límites dados; esto es debido a que el cemento puzolánico es más pesado con respecto al filler de la granulometría propuesta lo que hace que las probetas compactadas bajen el volumen de la relación de finos y bitumen, por lo cual su peso disminuye respecto a la mezcla sin modificar.
2. Debido a que el diseño de mezcla asfáltica propuesto en este trabajo con el uso del cemento puzolánico tipo I (PM) como filler, no cumple las especificaciones del diseño de mezcla asfáltica tradicional. Este diseño granulométrico que cumple con los parámetros mínimos de la norma ASTM D 3515 indica que, aunque se diseñe dentro de los límites gráficos de las especificaciones de la norma, se deben de realizar varios diseños en donde podamos tener mayor cantidad de agregado fino y así poder sustituirlo por el cemento puzolánico, para tener mayor cantidad de finos y poder cumplir con el porcentaje de vacíos en una mezcla asfáltica modificada.
3. Por medio del ensayo de porcentaje de vacíos-densidad, se determinó que el diseño de mezcla asfáltica sin modificar llenó los requerimientos de la sección 401 de la Dirección de Caminos, en el rango de cemento

asfáltico de 5,5 a 6 %, pero la mezcla asfáltica modificada con cemento puzolánico no cumple en ninguno de los porcentajes utilizados, esto debido a que el volumen de los agregados disminuye debido a que el peso específico del cemento es mayor al producido por el polvo de roca, lo cual hace que el cemento asfáltico y el filler sea menor para recubrir las partículas mayores de los agregados; por lo cual, la mezcla modificada no cumple en el porcentaje de vacíos requerido.

4. La resistencia a la carga, como se puede observar en los resultados obtenidos, ambos diseños cumplen con el rango mínimo de 1 200 lbf teniendo en el diseño de mezcla tradicional un rango de estabilidad entre 1 700 y 2 500 lbf pero en la mezcla modificada con cemento puzolánico, la estabilidad disminuye, teniendo un rango entre 1 500 y 1 900 lbf aproximadamente, siendo afectada la mezcla modificada por la baja relación que existe entre el filler y el cemento asfáltico, lo cual indica una mayor cantidad de vacíos.
5. Tomando en cuenta que el cemento puzolánico tipo I (PM), se sustituyó por el filler de la mezcla en un 2 %, los costos del diseño de la mezcla asfáltica modificada con este material se incrementan, debido que comparando costos de filler con cemento puzolánico, este último es mucho más costoso. Por ello, entre más sea el porcentaje a sustituir por el filler de la granulometría, el costo se incrementará. Si la estabilización se realizara en planta, en una región alejada del proveedor, el costo se aumentará aún más.

RECOMENDACIONES

1. Si se desea utilizar materiales muy densos en el diseño de mezcla asfáltica, no se debe de sustituir este material por el filler, sino agregarlo como material extra en el diseño de mezcla, para que el costo sea más bajo y el rendimiento sea óptimo.
2. Cuando se desea diseñar una mezcla asfáltica, se debe basar en los parámetros que rigen la norma ASTM D3515, pero cumplir con estos diseños no significa que se tenga asegurado el rendimiento óptimo de la mezcla asfáltica, ya que los parámetros no toman en cuenta la forma del agregado y su textura. Por lo cual se recomienda realizar más de un diseño granulométrico para obtener el de mejor rendimiento.
3. Se procura en el diseño de mezclas controlar el porcentaje de vacíos, debido a que entre más partículas mayores de los agregados contenga la mezcla, nos dan mayor resistencia, pero los vacíos aumentan; al agregar mayor cantidad de partículas gruesas también la deformación baja. Entonces se debe agregar mayor cantidad de finos, pero esta relación debe de controlarse desde un inicio para no tener demasiados cambios en los diseños de granulometría y la cantidad de cemento asfáltico a agregar.
4. En las mezclas asfálticas que se incorporen cemento puzolánico tipo I (PM) como filler, se debe de realizar de una manera estricta, para llevar un control de la dosificación en la mezcla asfáltica, debido a que el

exceso de cemento puzolánico tiende a rigidizar la mezcla, que es un factor que se debe evitar en pavimentos flexibles.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Association of State Highways and Transportation Officials. AASHTO T245. EE.UU.: AASHTO, 2013. 1 600 p.
2. American Society for Testing and Materials. *Hot-mixed, hot-laid bituminous paving mixtures*. ASTM D3515. EUA: ASTM, 2001. 5 p.
3. _____ . *Standard specification for fine aggregate for bituminous paving mixtures*. ASTM D1073. EE.UU.: ASTM, 1999. 2 p.
4. _____ . *Test method for resistance of plastic flow of bituminous mixtures using Marshall Apparatus* ASTM D1559. EUA: ASTM, 2001. 4 p.
5. DEL CID MORALES, Javier. *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 de Ingeniería civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2016. 147 p.
6. Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. Guatemala: Cámara Guatemalteca de la Construcción, 2001. 724 p.

7. _____ . *Red vial de Guatemala año 2013*. Guatemala: Departamento de Ingeniería de Tránsito, 2014. 119 p.
8. 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.
9. 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.
10. RAMÍREZ TURCIOS, Osmar. *Diseño de mezclas de concreto asfáltico drenante, utilizando asfaltos modificados para superficies de rodadura*. Trabajo de graduación de Ingeniería civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2009. 111 p.
11. TAHUITE ARANA, Ismael. Facultad de Ingeniería. *Metodología, diseño y aplicación de un mortero asfáltico modificado (microsurfacing) para el proyecto M-30-2009*. Trabajo de graduación de Ingeniería civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2011. 148 p.

APÉNDICES

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



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

Apéndice 2. **Agregado utilizado en el diseño de la mezcla asfáltica**



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

Apéndice 3. **Mezcla asfáltica utilizada en el diseño**



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

Apéndice 4. **Probetas compactadas a diferentes porcentajes de bitumen**



Fuente: 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: 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 2010

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 correcciones 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*. p. 489.

Anexo 3. Informe estabilidad y flujo Marshall



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



No. **09529**

INFORME NUMERO: 020 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 36957

INTERESADO: HERBERT MANUEL LÓPEZ ALVARADO - 200819560

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION INGENIERIA CIVIL: USO DEL CEMENTO PUZOLANICO TIPO 1 (PM) COMO FILLER PARA MODIFICAR MEZCLAS ASFÁLTICAS, EN CALIENTE POR MEDIO DEL DISEÑO MARSHALL

DIRECCION: CII/FIUSAC

ENSAYO: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 1559

FECHA: 16 DE MARZO DEL 2017

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE NORMAL (AGREGADO GRUESO Y FINO)

PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
1 AC 20 4%	2323,58	9
2 AC 20 4%	3030,21	8
1 AC 20 4,5%	1486,34	11
2 AC 20 4,5%	2121,89	13
1 AC 20 5%	1913,77	14
2 AC 20 5%	1149,90	14
1 AC 20 5,5%	2210,30	15
2 AC 20 5,5%	1709,33	16

Atentamente,

Vo. Bo. :



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





Ing. Dario Francisco Lucas Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos



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

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

Anexo 4. Informe estabilidad y flujo Marshall



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



No. **09530**

INFORME NUMERO: 021 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 36957

INTERESADO: HERBERT MANUEL LÓPEZ ALVARADO - 200819560

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION INGENIERIA CIVIL: USO DEL CEMENTO PUZOLANICO TIPO 1 (PM) COMO FILLER PARA MODIFICAR MEZCLAS ASFÁLTICAS, EN CALIENTE POR MEDIO DEL DISEÑO MARSHALL

DIRECCION: CII/FIUSAC

ENSAYO: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 1559

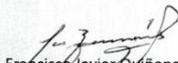
FECHA: 16 DE MARZO DEL 2017

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE NORMAL (AGREGADO GRUESO Y FINO)

PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
1 AC 20 6%	1615,03	16
2 AC 20 6%	1832,05	20
1 AC+CP 20 4%	2275,90	12
2 AC+CP 20 4%	1577,40	10
1 AC+CP 20 4,5%	1731,50	10
2 AC+CP 20 4,5%	1877,32	17
1 AC+CP 20 5%	1458,99	15
2 AC+CP 20 5%	1286,59	15

Atentamente,

Vo. Bo. :



Ing. Francisco Javier Quiñonez 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. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
 Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

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

Anexo 5. Informe estabilidad y flujo Marshall



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



No. 09531

INFORME NUMERO: 022 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 36957

INTERESADO: HERBERT MANUEL LÓPEZ ALVARADO - 200819560

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION INGENIERIA CIVIL: USO DEL CEMENTO PUZOLANICO TIPO 1 (PM) COMO FILLER PARA MODIFICAR MEZCLAS ASFÁLTICAS, EN CALIENTE POR MEDIO DEL DISEÑO MARSHALL

DIRECCION: CII/FIUSAC

ENSAYO: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 1559

FECHA: 16 DE MARZO DEL 2017

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE NORMAL (AGREGADO GRUESO Y FINO)

PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
1 AC + CP 20 5,5%	1458,99	18
2 AC + CP 20 5,5%	1886,43	19
1 AC + CP 20 6%	1521,65	15
2 AC + CP 20 6%	1504,70	16

Atentamente,

Vo. Bo. :


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




Ing. Dario Francisco Lucas Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos

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

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

Anexo 6. Informe gravedad específica *bulk*



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



INFORME NUMERO: 023 L.B.A ORDEN DE TRABAJO: 36957 No. **09532**

INTERESADO: HERBERT MANUEL LÓPEZ ALVARADO - 200819560

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN INGENIERÍA CIVIL: USO DEL CEMENTO PUZOLÁNICO TIPO 1 (PM) COMO FILLER PARA MODIFICAR MEZCLAS ASFÁLTICAS, EN CALIENTE POR MEDIO DEL DISEÑO MARSHALL.

DIRECCION: CII/FIUSAC

ENSAYO: DENSIDAD ESPECIFICA DE BULK ASTM 2726-05a

FECHA: 16 DE MARZO DEL 2017

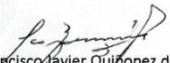
MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE NORMAL (AGREGADO GRUESO Y FINO)

PROBETA	GRAVEDAD ESPECIFICA
1 AC 20 4 %	2,354
2 AC 20 4 %	2,375
1 AC 20 4,5 %	2,364
2 AC 20 4,5 %	2,372
1 AC 20 5 %	2,382
2 AC 20 5 %	2,368
1 AC 20 5,5 %	2,423
2 AC 20 5,5 %	2,418
1 AC 20 6 %	2,444
2 AC 20 6 %	2,441
1 AC + CP 20 4 %	2,338

PROBETA	GRAVEDAD ESPECIFICA
2 AC + CP 20 4 %	2,337
1 AC + CP 20 4,5 %	2,349
2 AC + CP 20 4,5 %	2,354
1 AC + CP 20 5 %	2,371
2 AC + CP 20 5 %	2,362
1 AC + CP 20 5,5 %	2,378
2 AC + CP 20 5,5 %	2,361
1 AC + CP 20 6 %	2,407
2 AC + CP 20 6 %	2,397

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. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

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

Anexo 7. Informe densidad específica teórica máxima



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



INFORME NUMERO: 024 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 36957

No. **09533**

INTERESADO: HERBERT MANUEL LÓPEZ ALVARADO - 200819560

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN INGENIERÍA CIVIL: USO DEL CEMENTO PUZOLÁNICO TIPO 1 (PM) COMO FILLER PARA MODIFICAR MEZCLAS ASFÁLTICAS, EN CALIENTE POR MEDIO DEL DISEÑO MARSHALL

DIRECCION: CII/FIUSAC

ENSAYO: DENSIDAD ESPECIFICA TEORICA MAXIMA "RICE" ASTM 2041

FECHA: 16 DE MARZO DEL 2017

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE NORMAL (AGREGADO GRUESO Y FINO)

NORMAL

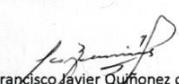
PROBETA	GMM
AC 20 4%	2,6820
AC 20 4,5%	2,6400
AC 20 5%	2,6140
AC 20 5,5%	2,5470
AC 20 6%	2,5310

CEMENTO

PROBETA	GMM
AC + CP 20 4%	2,6300
AC + CP 20 4,5%	2,6040
AC + CP 20 5%	2,6010
AC + CP 20 5,5%	2,5720
AC + CP 20 6%	2,5480

Atentamente,

Vo. Bo. :


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


Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos
 Jefe Laboratorio de Asfaltos

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

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

