



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

MEZCLAS ASFÁLTICAS ELABORADAS CON EMULSIÓN TIPO CSS1h

Byron Ricardo Pelaéz Ascencio

Asesorado por el Ing. Yefry Valentín Rosales Juárez

Guatemala, noviembre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

MEZCLAS ASFÁLTICAS ELABORADAS CON EMULSIÓN TIPO CSS1h

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

BYRON RICARDO PELAÉZ ASCENCIO

ASESORADO POR EL ING. YEFRY VALENTÍN ROSALES JUÁREZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

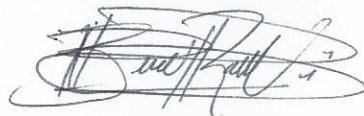
DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Claudio César Castañón Contreras
EXAMINADOR	Ing. José Gabriel Ordóñez Morales
EXAMINADOR	Ing. Armando Fuentes Roca
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

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:

MEZCLAS ASFÁLTICAS ELABORADAS CON EMULSIÓN TIPO CSS1h

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 24 de noviembre de 2015.



Byron Ricardo Pelaéz Ascencio

Guatemala, 04 de septiembre del 2018.

Ingeniero
José Gabriel Ordoñez Morales
Jefe del Área de Materiales
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero:

Por este medio le informo que he revisado el trabajo de graduación titulado: **“MEZCLAS ASFÁLTICA ELABORADAS CON EMULSIÓN TIPO CSS1h”**, presentado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Civil Byron Ricardo Peláez Ascencio, con carné 2008-18974, tema para el cual fui asignado como asesor.

El mencionado trabajo de graduación llena los requisitos para mi aprobación, por lo anterior, en mi calidad de asesor, me permito se continúe el proceso de aprobación.

Atentamente,


Ing. Yefry Valentín Rosales Juárez

Colegiado No. 7177

ASESOR



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

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

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Guatemala,
09 de octubre de 2018

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


Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **MEZCLAS ASFÁLTICA ELABORADAS CON EMULSIÓN TIPO CSS1h** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Byron Ricardo Peláez Ascencio quien contó con la asesoría del Ing. Yefry Valentín Rosales Juárez.

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

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


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



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/mrrm.



Más de 138 años de Trabajo y Mejora Continua



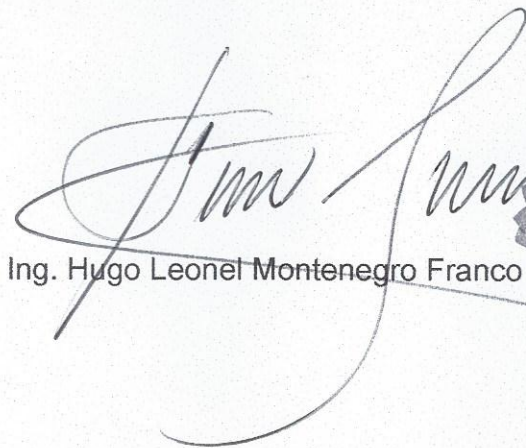
USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

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

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Yefry Valentín Rosales Juárez y Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación del estudiante Byron Ricardo Peláez Ascencio, MEZCLAS ASFÁLTICA ELABORADAS CON EMULSIÓN TIPO CSS1h da por este medio su aprobación a dicho trabajo.



Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, noviembre 2018

/mrm.



Más de 138 años de Trabajo y Mejora Continua

Universidad de San Carlos
de Guatemala

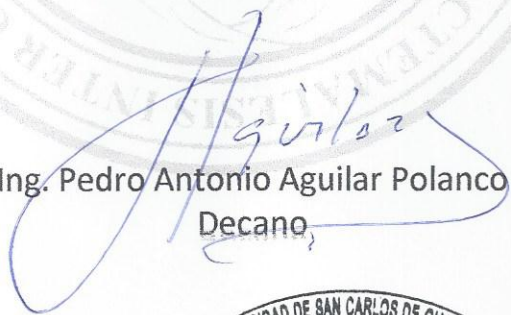


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 500.2018

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: **MEZCLAS ASFÁLTICAS ELABORADAS CON EMULSIÓN TIPO CSS1h**, presentado por el estudiante universitario: **Byron Ricardo Peláez Ascencio**, 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 2018



/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por darme fuerza y sabiduría en los momentos más difíciles, y la oportunidad de vivir.
- Mis padres** José Pelaéz y Domitila Ascencio, por ser mi ejemplo a seguir, por el apoyo brindado en cada momento y guiarme en camino correcto.
- Mi esposa** Karla Díaz, por la motivación y consejos para lograr una meta más en mi vida.
- Mis Hermanos** Boanerges, Noé, Daniela Y Katy Pelaéz, Por su apoyo y motivación para lograr esta meta.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ayudarme y llenarme de sabiduría en el camino para lograr esta meta.
Facultad de Ingeniería	Por ser mi segunda casa, y a la facultad de ingeniería, por formarme como profesional.
Ing. Yefry Rosales	Por su apoyo, sus conocimientos compartidos y amistad a lo largo de mi formación profesional.
Ing. José Juan Istupe	Por brindarme sus conocimientos, apoyo en el laboratorio de asfaltos y amistad.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Estudios realizados con mezclas asfálticas en frío.....	1
1.1.1. Asfaltos modificados con polímeros	1
1.1.2. Incidencia del origen de los materiales calizos y basálticos en el diseño de mezclas de concreto asfáltico, Método Marshall	2
1.2. Mezclas asfálticas utilizadas.....	3
1.3. Situación actual de los asfaltos	5
2. MARCO CONCEPTUAL GENERAL	9
2.1. Mantenimiento del pavimento asfáltico.....	9
2.2. Sistema de administración de pavimentos	9
2.3. Tratamiento de mantenimiento preventivo.....	12
2.3.1. Sellado de grietas	15
2.3.2. Riego asfáltico	15
2.3.2.1. Riego de imprimación	16
2.3.2.2. Riegos negros con emulsión diluida	16
2.3.2.3. Riegos de liga.....	17

2.3.2.4.	Riegos de sello	17
2.3.2.5.	Morteros asfálticos	18
2.3.3.	Micropavimentos	19
2.3.4.	Capa asfáltica de refuerzo en frío o caliente	20
2.3.5.	Bacheo superficial	21
2.3.6.	Fresado	22
2.4.	Normatividad	23
2.5.	Mezcla densa en frío	24
2.6.	Qué es un bache	25
2.6.1.	Como se generan	26
2.6.2.	Soluciones	27
2.7.	Procedimiento para bacheo	27
2.8.	Procedimiento de ensayo	29
2.8.1.	Gravedad específica bruta	29
2.8.2.	Gravedad específica teórica máxima	29
2.8.3.	Porcentaje de vacíos-densidad	30
2.8.4.	Prueba de estabilidad-flujo Método tradicional.....	30
2.8.4.1.	Diseño de mezclas ASTM D 1559.....	31
2.9.	Materiales.....	32
2.10.	Preparación de una mezcla en frío	38
2.10.1.	Requisitos para la mezcla asfáltica en frío	39
2.10.2.	Determinación de agregado grueso y fino.....	40
2.10.2.1.	Agregado grueso.....	40
2.10.2.2.	Agregado fino	40
2.10.3.	Determinación del tipo de emulsión	41
2.10.4.	Cálculo del porcentaje óptimo teórico de asfalto en una mezcla	41

2.10.4.1.	Método del Laboratorio Central de Puentes y Caminos en Francia (LCPC).....	41
2.10.4.2.	Método del Instituto del asfalto (EU)....	42
2.10.4.3.	Método de diseño Marshall Modificado	42
2.10.5.	Colocación y compactación	42
2.10.6.	Extracción de núcleos y muestras tipo pastillas.....	43
2.11.	Ventajas.....	46
2.12.	Limitaciones.....	46
3.	DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO.....	49
3.1.	Caracterización de la mezcla.....	49
3.2.	Gravedad específica <i>Bulk</i>	52
3.2.1.	Metodología	52
3.2.2.	Procedimiento.....	54
3.3.	Gravedad específica teórica máxima	55
3.3.1.	Metodología	55
3.3.2.	Procedimiento.....	58
3.4.	Porcentaje de vacíos-densidad	60
3.4.1.	Metodología	60
3.4.2.	Procedimiento.....	60
3.5.	Prueba de estabilidad-flujo Método tradicional	61
3.5.1.	Metodología	61
3.5.2.	Procedimiento.....	64
3.6.	Experiencias sobre el curado de mezclas asfálticas en frío	65
3.6.1.	Ensayo de inmersión y vacío parcial	66
3.6.1.1.	Procedimiento.....	66

4.	DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	67
4.1.	Fabricación de probetas de mezcla con emulsión asfáltica	67
4.1.1.	Procedimiento	69
4.2.	Caracterización del tipo de emulsión.....	70
4.3.	Cálculo de porcentaje óptimo teórico de asfalto en una mezcla.....	71
4.4.	Gravedad específica <i>Bulk</i>	72
4.4.1.	Cálculos, datos y presentación de resultados	72
4.5.	Gravedad específica teórica máxima	73
4.5.1.	Cálculos, datos y presentación de resultados	74
4.6.	Porcentaje de vacíos-densidad	75
4.6.1.	Cálculos, datos y presentación de resultados	75
4.7.	Prueba de estabilidad-flujo Método tradicional.....	76
4.7.1.	Cálculos, datos y presentación de resultados	76
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	79
5.1.	Comparación con otros estudios realizados.....	79
5.2.	Interpretación de resultados.....	80
	CONCLUSIONES.....	87
	RECOMENDACIONES	89
	BIBLIOGRAFÍA.....	91
	APÉNDICES.....	93
	ANEXOS.....	97

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Mapa red vial primaria de Guatemala	5
2.	Mapa red vial secundaria de Guatemala.....	6
3.	Autopista Palín-Escuintla	7
4.	Categoría de mantenimiento de pavimentos.....	11
5.	Pavimentación con fresadora y pavimentadora	22
6.	Dispositivo para extraer un núcleo de pavimento.....	45
7.	Curva granulométrica del diseño de mezcla asfáltica	51
8.	Balanza provista de dispositivo de suspensión	53
9.	Pileta con agua para suspensión de probeta	54
10.	Bomba de vacío, picnómetro para vacío y dispositivo de agitación. Dispositivo para atrapar el vapor de agua y manómetro de presión residual	57
11.	Picnómetro para vacío y balanza	58
12.	Anillo dinamométrico, deformímetro de lectura fija. Dispositivo de compresion para rotura de probetas	63
13.	Recipiente con control termostático	64
14.	Mezcla de los agregados pétreos junto con emulsión asfáltica.....	68
15.	Probetas compactadas.....	69
16.	Preparación de la emulsión asfáltica.....	71
17.	Gráfico de gravedad específica <i>bulk</i>	81
18.	Gráfico de gravedad específica teórica máxima	82
19.	Gráfico de porcentaje de vacíos.....	83
20.	Gráfico de estabilidad Marshall	84

21.	Gráfico de flujo Marshall	85
22.	Gráfico de estabilidad-fluencia.....	86

TABLAS

I.	Tipología de los deterioros en pavimentos y posibles causas	13
II.	Posibles tratamientos de mantenimiento preventivo para cada tipo de deterioro.....	14
III.	Normas de ensayos	31
IV.	Requisitos de los agregados pétreos.....	32
V.	Requisitos de graduación para el polvo mineral	34
VI.	Requisitos para los materiales bituminosos.....	35
VII.	Requisitos para los materiales bituminosos según su aplicación	37
VIII.	Requisitos para la mezcla asfáltica en frío.....	39
IX.	Tipos de graduación para mezclas asfálticas en frío (Manual MS-4 Instituto Asfalto) *.....	50
X.	Diseño de mezcla asfáltica tradicional	51
XI.	Datos de los resultados de gravedad específica <i>bulk</i>	73
XII.	Datos de los resultados de gravedad específica teórica máxima	74
XIII.	Datos de los resultados de porcentaje de vacíos.....	76
XIV.	Datos de los resultados de estabilidad-flujo.....	77
XV.	Cuadro de comparación con otro estudio realizado.....	80
XVI.	Resultado de gravedad específica <i>bulk</i>	80
XVII.	Resultado de gravedad específica teórica máxima	81
XVIII.	Resultado de porcentaje de vacíos.....	82
XIX.	Resultado de estabilidad Marshall	83
XX.	Resultado de flujo Marshall.....	84
XXI.	Resultado de relación estabilidad-fluencia.....	85

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
AC	<i>Asphalt cement</i>
CR	Caminos rurales
SC	Cemento asfáltico de evaporación lenta
MC	Cemento asfáltico de evaporación mediana
RC	Cemento asfáltico de evaporación rápida
cS	<i>centiStokes</i>
Delft	Deformación igual a 0,0001”
SS	Emulsión de fraguado lento
MS	Emulsión de fraguado medio
RS	Emulsión de fraguado rápido
QS	Emulsión de fraguado ultrarápido
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
P1	Masa inicial de la probeta, en gramos
P2	Masa final de la probeta, en gramos
mts	Metros
mm	Milímetros
mm Hg	Milímetros de mercurio
Pa-s	Pascales-segundo
VA	Porcentaje de vacíos
VAM	Porcentaje de vacíos en el agregado mineral
VFA	Porcentaje de vacíos llenados con asfalto
psi	<i>Pounds-force per square inch</i> (libras-fuerza por pulgada cuadrada)
P	Valor de pérdida por desgaste, en %

GLOSARIO

AASHTO	Siglas en inglés para la <i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i> (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 <i>la American Society of Testing Materials</i> (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.
Contenido de asfalto	Cantidad de asfalto que se adiciona a la mezcla de agregados pétreos para obtener las cualidades deseadas de la mezcla.
CSS1h	Emulsión asfáltica catiónica de quiebre lento, de residuo duro, color café oscuro y estado líquido.
Deformímetro	Instrumento que mide desplazamientos lineales.
Densidad	Relación que existe entre la masa y el volumen que ocupa una sustancia.
Emulsión asfáltica	Dispersión de micro-partículas de cemento asfáltico en una matriz acuosa estabilizada.
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.
Ftn	Franja transversal del norte
Granulometría	Distribución de los diferentes tamaños de las partículas de un agregado.

Gravedad específica	Propiedad obtenida de la comparación de la densidad de una sustancia, con la densidad de una sustancia patrón.
INV	Instituto Nacional de Vías de Colombia.
Manómetro	Instrumento utilizado para medir la presión de un fluido, especialmente de los gases.
Milímetros de mercurio	Presión ejercida en la base de una columna de un milímetro de altura de mercurio.
Parafina	Sustancia sólida, blanca, translúcida, inodora y que funde fácilmente, que se obtiene de la destilación del petróleo o de materias bituminosas naturales y se emplea para fabricar velas y para otros usos.
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.
Severidad	La condición de aquello que es estricto en el cumplimiento de las normas o que resulta duro, inflexible o crudo.
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 de este trabajo de investigación es el estudio de las mezclas asfálticas en frío, para el análisis de sus cambios físicos, mecánicos y volumétricos, elaboradas con distintos porcentajes de agua y emulsión tipo CSS1h, que cumplan con una granulometría C2 según las especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes de la Dirección General de Caminos en la sección 403.

En la parte inicial de la investigación se presentan algunos antecedentes realizados con mezclas asfálticas en frío, las cuales se tomaron como referencia para la realización del presente trabajo, además de las diferentes mezclas asfálticas, tanto mezclas en caliente como mezclas en frío, utilizadas en los diferentes tipos de mezclas en pavimentos flexibles, como las emulsiones asfálticas; estas con referencia a las especificaciones de la Dirección General de Caminos, también se presenta una breve descripción de la situación actual de los asfaltos en Guatemala.

En la siguiente parte de la investigación se muestran las normativas en las que se basa el presente trabajo; conceptos básicos de mezclas asfálticas en frío, los diferentes materiales que se utilizan para la elaboración de las diferentes probetas, en el análisis de las mismas. y las diferentes metodologías de los distintos ensayos realizados.

Posterior a la descripción del experimento, se presenta el desarrollo experimental en el cual se describen los datos obtenidos de los ensayos, los diferentes cálculos y los resultados correspondientes a los mismos.

Por último se presenta el análisis de resultados, en esta parte de la investigación podremos encontrar la comparación de los resultados obtenidos, con otros estudios realizados en situaciones similares; se describe la interpretación de todos los resultados de los diferentes ensayos que se sometieron las probetas, con diferentes porcentajes de emulsión en cada una de ellas.

OBJETIVOS

General

Verificar el comportamiento físico, mecánico y volumétrico de las mezclas asfálticas en frío, fabricado con emulsión tipo CSS1h, con una granulometría C2, con variación de porcentaje de emulsión y agua, para la elaboración de mezclas para bacheo.

Específicos

1. Encontrar un rango óptimo de emulsión y agua, para un diseño de mezcla asfáltica en frío que cumpla con todos los parámetros de calidad.
2. Dar a conocer información necesaria para el control de calidad en la aplicación de la mezcla asfáltica en frío para bacheo.
3. Determinar las propiedades físicas y propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en frío, fabricadas con emulsión tipo CSS1h.

INTRODUCCIÓN

Las mezclas asfálticas en frío, constituyen la relación entre asfalto, emulsión y sus agregados combinados; así como la proporción de sus agregados, para analizar sus cambios físicos, mecánicos y volumétricos de la mezcla asfáltica en frío, elaborados con emulsión tipo CSS1h.

Para ello se pretende realizar el presente estudio para determinar el comportamiento de una mezcla asfáltica en frío, fabricada con emulsión tipo CSS1h, para una granulometría C2, según la sección 403, Especificaciones Generales para construcción de carreteras y puentes. Para analizar sus cambios físicos, mecánicos y volumétricos en condición ambiente con distintos porcentajes de emulsión y agua, por la alta demanda, debido al deterioro de la real vial en Guatemala, principalmente en el área de bacheo; por esta razón, es esencial tener una mejor referencia de mezclas asfálticas en frío, los normativos correspondientes para realizar dicho estudio son: *American Section Of The International Association For Testing Materials (Astm)*, *American Association Of State Highway And Transportation Officials (Aashto)* Y *Especificaciones Generales Para Construcción De Carreteras Y Puentes*.

Los resultados que se pretende encontrar: el comportamiento mecánico de las mezclas en frío con emulsión tipo CSS1h; un mejor aprovechamiento a la hora de la colocación mediante los parámetros que se pueden obtener con la elaboración de un documento que caracterice y describa el comportamiento de las mezclas en frío, teniendo en cuenta los inconvenientes que se puedan presentar durante dichas pruebas.

1. ANTECEDENTES

En esta sección se presentan algunos antecedentes, de temas relacionados con estudios realizados con mezclas asfálticas en frío.

1.1. Estudios realizados con mezclas asfálticas en frío

En Guatemala, encontramos los siguientes estudios realizados con mezclas asfálticas en frío:

1.1.1. Asfaltos modificados con polímeros

Para el estudio de asfaltos modificados con polímeros la autora, Ingeniera Martha Dina Avellán Cruz, presenta dicho trabajo de investigación en mayo de 2 007, ante la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, con este trabajo, la autora nos brinda información necesaria para evaluar las características físico-mecánicas de asfaltos AC-20 modificados con polímeros, de acuerdo a las especificaciones aplicables.

Posterior a los estudios y ensayos realizados por la autora, nos indica que el uso de polímeros para la modificación de asfaltos disminuye la susceptibilidad térmica de este, también nos indica que el uso de polímeros elastómeros significa un aumento en la viscosidad, de esta forma la mezcla asfáltica es más resistente y el riesgo de fluir a temperaturas altas, disminuye.

La autora nos recomienda aplicar esta nueva técnica a la pavimentación de carreteras debido a que se pueden disminuir los espesores de la capa de

rodadura y la capacidad estructural de esta sigue siendo la misma; además, de disminuir costos en el mantenimiento preventivo. Así también recomienda darle seguimiento a temas similares, utilizando diferentes clases de polímeros.

1.1.2. Incidencia del origen de los materiales calizos y basálticos en el diseño de mezclas de concreto asfáltico, Método Marshall

Para el estudio de incidencia del origen de los materiales calizos y basálticos en el diseño de mezclas de concreto asfáltico Método Marshall el autor, Ingeniero Marco Antonio Mendoza Expanel, presenta dicho trabajo de investigación en octubre de 2 009, ante la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, con el objetivo de evaluar el comportamiento de los materiales calizos y basálticos, en el diseño de mezclas de concreto asfáltico y conocer las características y cualidades de dichos materiales, así como evaluar las ventajas de utilizar pavimentos flexibles hecho con mezcla asfáltica, usando material calizo y material basáltico.

Luego de todos los estudios y ensayos correspondientes para dicho tema, el autor concluye que los dos tipos de materiales dan a conocer que ambos son satisfactorios para realizar mezclas de acuerdo a especificaciones a que las variaciones que se reflejan son fundamentalmente por la afinidad del cemento asfáltico con el material; por ejemplo, como el agregado calizo, su textura superficial es relativamente lisa y su composición mineralógica con alto contenido de carbonato de calcio, dificultan la adherencia del cemento asfáltico a las partículas de agregado.

También nos indica que ambos materiales son buenos para ser usados en el diseño de mezclas asfálticas, ya que las variaciones de costos son relativamente mínimas no incidieron directamente en los costos de producción.

1.2. Mezclas asfálticas utilizadas

- Mezclas asfálticas en caliente:

Se define como mezcla asfáltica (o bituminosa) en caliente a la combinación de áridos (incluido el polvo mineral) con un ligante. Las cantidades relativas de ligante y áridos determinan las propiedades físicas de la mezcla. De las mezclas en caliente se utilizan las siguientes:

- Mezcla asfáltica en caliente tipo F (9,5 mm)

Por tener agregados máximos de 3/8 de pulgada, es una mezcla fina, su textura es bastante cerrada o lisa. Es ideal para espesores menores de 5 centímetros, por lo que se utiliza en calles internas de residenciales o condominios y parqueos de centros comerciales o restaurantes. También sirve para realizar bacheos.

- Mezcla asfáltica en caliente tipo E (12,5 mm)

Es una mezcla asfáltica intermedia con agregados máximos de 1/2", se puede utilizar para espesores entre 5 y 8 cm o para bacheos. Su textura es más abierta que la mezcla F (9,5 mm).

- Mezcla asfáltica en caliente tipo D (19 mm)

Tiene agregados máximos de 3/4 de pulgada, es una mezcla más gruesa, su textura es más abierta y un poco más áspera. Se utiliza para espesores mayores de 5 centímetros y es recomendada para usarse en tramos carreteros, bulevares, etc.

- Mezclas asfálticas en frío

Son las mezclas fabricadas con emulsiones asfálticas; su principal campo de aplicación es en la construcción y en la conservación de carreteras secundarias. Para retrasar el envejecimiento de las mezclas abiertas en frío se suele recomendar el sellado por medio de lechadas asfálticas.

- Emulsiones asfálticas utilizadas

Las emulsiones usadas en Guatemala son las siguientes:

Emulsiones Asfálticas Aniónicas

- MS-2, MS-2h
- SS-1, SS-1h
- HFMS-2, HFMS-2h, HFMS-2s
- Catiónicas
- CMS-2, CMS-2h
- CSS 1, CSS-1h

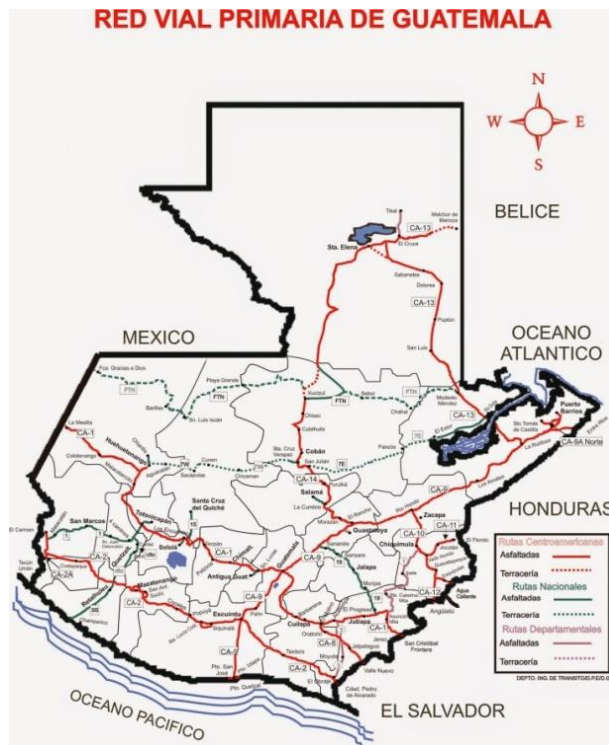
1.3. Situación actual de los asfaltos

La red vial de Guatemala está compuesta por tres tipos de carreteras: Las de primer, segundo y tercer orden.

- De primer orden

Son las asfaltadas, entre las cuales destacan: La Carretera Panamericana que enlaza Guatemala con México y El Salvador. La Carretera Interoceánica que une Puerto Barrios y Puerto Quetzal, y la Costanera que acorre paralela a la costa del Pacífico. Algunas de estas rutas también son autopistas de cuatro y seis carriles, como la que va de la capital del país hacia Antigua Guatemala, y la que une la capital con Puerto Quetzal, pasando por Escuintla.

Figura 1. Mapa red vial primaria de Guatemala

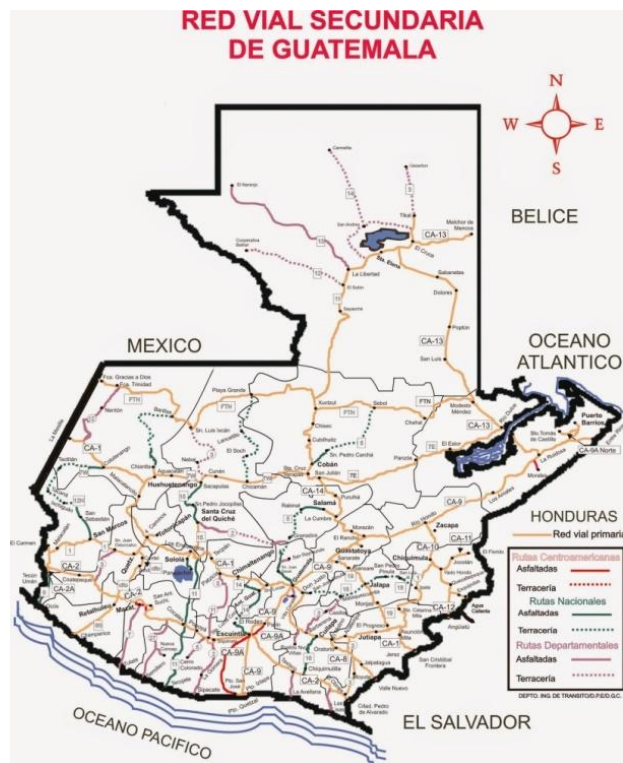


Fuente: Dirección General de Caminos, Departamento de Ingeniería de Tránsito.

- De segundo orden

Que son asfaltadas también, y no suelen ser tan anchas ni estar tan bien cuidadas como las del primer orden, pero complementan las redes principales y dan acceso a las áreas productivas de la costa sur, parte del altiplano y el nordeste del país.

Figura 2. Mapa red vial secundaria de Guatemala



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

- De tercer orden

O de terracería, que sólo son transitables en tiempo seco.

Actualmente la red vial está compuesta por 15 187,7 kilómetros de carreteras pavimentadas y accesibles para el transporte de carga y de pasajeros.

En los últimos 15 años, el sistema vial ha crecido a una tasa de 4 % anual, y durante este tiempo se han alcanzado importantes mejoras, como la construcción de autopistas y la expansión a cuatro carriles, de las principales carreteras de acceso a fronteras.

También la Ciudad de Guatemala cuenta con diversas carreteras y autopistas que la conectan al resto del país, por medio de varias autopistas, como la Autopista Palín-Escuintla y la de Guatemala-Aguas Calientes, y las carreteras que la conectan al occidente del país, específicamente a los departamentos de Quetzaltenango, San Marcos, Huehuetenango y Quiché.

Además, en los últimos cinco años, se han vuelto a pavimentar las autopistas de la ruta al Pacífico (CA-2) y la ruta Panamericana (CA-1).

Figura 3. Autopista Palín-Escuintla



Fuente: www.carreteras-pa.com/noticias/guatemala-lanzaria-primera-app-infraestructura-noviembre/. Consulta enero de 2018.

2. MARCO CONCEPTUAL GENERAL

2.1. Mantenimiento del pavimento asfáltico

Las carreteras requieren de intervenciones, tanto por la obsolescencia propia de los materiales que las conforman, como por fallas, generalmente puntuales, que pueden tener su origen, ya sea en situaciones especiales no detectadas en el diseño o en problemas derivados de la construcción. Debe tenerse presente que parte importante de la obra de una carretera corresponden a suelos, los cuales, si no son colocados y compactados correctamente durante la construcción, pueden presentar diversas fallas en el pavimento asfáltico. Así mismo, sus condiciones y propiedades pueden cambiar al variar las condiciones ambientales y por otros factores que no pueden ser controlados ni previstos.

Los trabajos realizados para proporcionar un mantenimiento adecuado del pavimento se deben realizar en diferentes períodos y en diversas partes de la carretera, como el derecho de vía, hombros, drenajes, cunetas, taludes y otros, con el fin de que se conserven en buenas condiciones para prestar el servicio para el cual fueron diseñados. El mantenimiento vial permite conservar el pavimento más allá de su período de diseño, lo que significa, a largo tiempo, un ahorro de recursos económicos.

2.2. Sistema de administración de pavimentos

Los sistemas de administración de pavimentos generalmente incluyen modelos para determinar el tipo de mantenimiento adecuado a colocarse en la

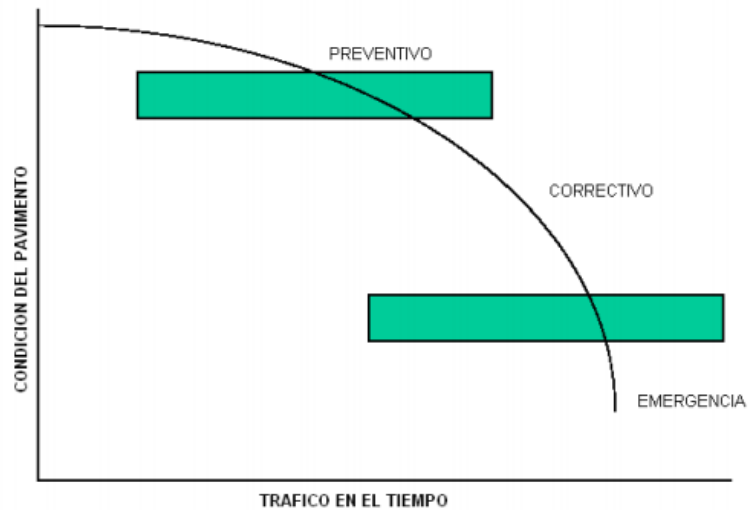
carretera. El tratamiento más efectivo se determinará en base al tipo de pavimento, su condición y otros factores importantes. Así mismo, es importante analizar factores como el costo del tratamiento y viabilidad del mismo. Debe tomarse en cuenta que el mantenimiento debe realizarse en el momento adecuado para que el pavimento funcione según se diseñó y la inversión económica se haga de forma efectiva.

Actualmente existen dos tipos de mantenimiento: correctivo y el preventivo. El mantenimiento preventivo se realiza para detener deterioros menores y reducir la necesidad de recurrir a un mantenimiento correctivo. Se realiza antes de que el pavimento presente una fatiga significativa y fallas a nivel estructural.

El mantenimiento correctivo se realiza cuando la carretera presente deficiencias, tales como pérdida de fricción, ahuellamiento, agrietamiento generalizado, etc. Los sistemas de tratamiento correctivo pueden ir desde una rehabilitación hasta la reconstrucción del mismo.

Ambos tipos de mantenimiento son necesarios en un completo programa de preservación de pavimentos. Sin embargo, siempre se trata de poner mayor énfasis en el mantenimiento preventivo, para poder evitar que el pavimento alcance la condición en la que se requiere de un mantenimiento correctivo, lo cual representaría un costo demasiado elevado.

Figura 4. **Categoría de mantenimiento de pavimentos**



Fuente: TEREZÓN, Sugey. *Programa de mantenimiento basado en la técnica de pavimentos perpetuos para la gestión municipal*. p. 65.

Las evaluaciones estructurales y técnicas se realizan a todos los caminos del sistema. La evaluación física puede realizarse a través de una inspección visual para identificar daños superficiales en la carpeta asfáltica, tales como roderas, piel de cocodrilo, entre otros. Las condiciones de la superficie son usualmente evaluadas a través de una inspección de campo, que incluya diversas pruebas de laboratorio. Los cambios estructurales pueden identificarse utilizando los resultados de la evaluación de las condiciones de la superficie, o realizando un estudio por deflectometría en el pavimento.

La administración de pavimentos generalmente se desarrolla a dos niveles: el nivel de red y el nivel de proyecto. La diferencia entre los niveles generalmente se encuentra en la cantidad de pavimentos que se considere, y en el propósito de la decisión. A nivel de red, las agencias incluyen los pavimentos de toda la red bajo su jurisdicción. Por otro lado, la cantidad de pavimentos que se considera a nivel de proyecto se reduce en un tramo o

sección sencilla de gestionar, la cual a veces corresponde a una sección original de construcción.

2.3. Tratamiento de mantenimiento preventivo

Existen diferentes tratamientos preventivos para el mantenimiento de los pavimentos flexibles. Una discusión comprensible de cada tratamiento se puede encontrar en el manual básico de las emulsiones asfálticas, incluyendo las condiciones en las que cada tratamiento puede ser efectivo y los daños del pavimento a los que está dirigido. La periodicidad con la que se aplican determina si estos son preventivos o correctivos.

Los tipos de daños en los pavimentos asfálticos se pueden clasificar en cuatro grandes familias, las cuales son:

- Fisuras y grietas

Son una serie de fracturas en la carpeta de rodadura y se presentan de forma longitudinal, transversal, o combinadas. Estas se pueden originar por una carga excesiva, fatiga, cambios de temperatura, daños por humedad, procesos de contracción o deficiencias en la carpeta asfáltica, base, sub-base o subrasante.

- Deformaciones superficiales

Se define como cualquier cambio en la forma original de la superficie de un pavimento flexible, puede ser causada por deficiencia en la carpeta asfáltica o de las capas inferiores. En el primer caso, el daño puede ser causado por exceso de asfalto, exceso de agua o la utilización de agregado liso y

redondeado. En el segundo caso puede ser por la deformación plástica de la capa o por espesor insuficiente de la base. Se manifiesta con ahuellamiento, ondulaciones, hundimientos, hinchamientos, etc.

- Desintegración

Es la ruptura del pavimento en fragmentos pequeños y sueltos o también la disgregación de las partículas del agregado integrante de la muestra. Normalmente es causado por deficiencias del asfalto, por oxidación, acción del agua o por la mala operación de los equipos de construcción. Se manifiesta como baches, desprendimientos, pérdida del agregado de la superficie.

- Otros deterioros

Como la aspereza debido a uno o varios de los problemas anteriores.

Tabla I. **Tipología de los deterioros en pavimentos y posibles causas**

Tipo de Deterioro o Defecto		Afecta a la capacidad		Causas	
		Estructural	Funcional	Asociada a cargas	No asociada a cargas
Agrietamiento	Por fatiga	X		X	
	En bloque	X			X
	Juntas y bodes	X			X
	Deslizamiento	X		X	
	Reflexión	X		X	X
	Transversales	X			X
Deformaciones	Ahuellamiento			X	
	Corrugaciones		X		X

Continuación de la tabla I.

Desintegración	Baches	X	X	X	
	Perdida de Agregado		X		X
	Perdida de ligante		X		X
Perdida de Fricción	Pulimento del agregado		X	X	
	Excudación		X		X

Fuentes: TEREZÓN, Sugey. *Programa de mantenimiento basado en la técnica de pavimentos perpetuos para la gestión municipal*. p. 72.

En la tabla II se muestran los posibles tratamientos a realizarse para cada tipo de deficiencia. Sin embargo, si el pavimento llegara a presentar fallas de tipo estructural, entonces se debe proceder a tomar acciones de mantenimiento de tipo correctivo y no preventivo.

Tabla II. Posibles tratamientos de mantenimiento preventivo para cada tipo de deterioro

Deterioros en pavimentos	Sellado de grietas	Riegos asfálticos	Microcarpeta	Lechada asfáltica	Bacheo superficial	Recapeo en frío o caliente	Fresado
Rugosidad							
Inestabilidad relativa			X			X	X
Estabilidad relativa						X	
Ahuellamiento			X			X	X
Grietas por fatiga		X	X	X	X	X	
Grietas transversales y longitudinales	X		X	X	X	X	

Continuación de la tabla II.

Exudación					X		X
Desintegración del pavimento		X	X	X	X		

Fuentes: TEREZÓN, Sugey. *Programa de mantenimiento basado en la técnica de pavimentos perpetuos para la gestión municipal*. p. 73.

2.3.1. Sellado de grietas

Se rellenan las fisuras con concreto asfáltico, pero el agregado debe ser arena, si el borde del pavimento se ha asentado, se debe llevar a su nivel utilizando concreto asfáltico de graduación densa. Este tratamiento es utilizado para prevenir que el agua y basura entren en las grietas del pavimento. El tratamiento puede incluir el rebajado para limpiar la grieta y crear un espacio para el sellante. Para realizar este tipo de reparación de fisuras se deben seguir los siguientes pasos.

- Se limpia el pavimento con escobillón y aire comprimido
- Se rellenan las fisuras con concreto asfáltico de graduación fina
- Se aplica riego de liga en la sección que se va a reparar
- Se nivelan los bordes asentados, extendiendo concreto asfáltico
- Se remueve toda vegetación cerca del pavimento

2.3.2. Riego asfáltico

Como su nombre lo indica, son riegos de asfalto sobre superficies de pavimentos existentes, suelos o bases estabilizadas. Su función es enriquecer

la superficie del pavimento e impedirle desmoronamiento y la oxidación. Entre las diferentes clases de riegos se pueden encontrar:

- Riegos de imprimación o penetración
- Riegos negros con emulsión diluida
- Riegos de liga
- Riegos de sello
- Morteros asfálticos

2.3.2.1. Riego de imprimación

Se refiere a la aplicación de un ligante hidrocarbonado sobre una capa granular, previo a la colocación sobre esta de una capa o de un tratamiento bituminoso. La imprimación es mezclada en la superficie de la base y cierra los huecos, endurece la superficie y colabora con la ligazón de la capa asfáltica a colocar encima. Este riego sirve para mejorar el agarre entre las capas bituminosas y las granulares, mejorando así la transmisión de cargas.

2.3.2.2. Riegos negros con emulsión diluida

Este riego permite que el pavimento adquiera un color negro uniforme en toda su superficie, fijando cualquier material suelto y sellando pequeñas fisuras. Por lo general, se utilizan emulsiones rápidas, pero en casos de superficies con mucho polvo, se puede utilizar una emulsión superestable. En algunos casos es necesario diluir la emulsión asfáltica.

2.3.2.3. Riegos de liga

En la construcción de una carretera en donde la capa de rodamiento está constituida por dos capas asfálticas, se procede a la aplicación de un riego de adherencia o “riego de liga”, la cual es una aplicación ligera de emulsión asfáltica o asfalto rebajado sobre un pavimento existente, para asegurar la adherencia entre la superficie de las capas asfálticas que se superpone.

La emulsión comúnmente usada en este país es la emulsión catiónica de corte rápido. En algunos casos se utilizan emulsiones medias. Es importante que el riego de liga sea lo más delgado posible para que libere el asfalto luego de romper. Generalmente, la nueva carpeta asfáltica se aplicará 30 minutos después de distribuida la emulsión. También es importante que el riego cubra uniformemente el área a ser pavimentada de modo que el comportamiento de la carretera sea lo más parecido a un elemento monolítico.

Se debe tomar en cuenta que la unión que se busca a través del riego de liga no siempre se consigue, ocasionando deterioros prematuros en el pavimento y una reducción de su vida de servicio. Para asegurar el correcto funcionamiento del riego de liga es aconsejable realizarlo durante un clima cálido, sin frío ni lluvia y evitar el tránsito sobre la superficie regada para no provocar un deslizamiento entre capas. De no ser posible evitar el tránsito, éste debe circular a menos de 30 km/h.

2.3.2.4. Riegos de sello

El riego de sello, a diferencia del resto de riegos asfálticos, implica un mejoramiento de una carpeta existente, sea de reciente construcción o no, por lo que es muy usado en trabajos de conservación o reconstrucción. Para

realizarlo es necesaria la aplicación de un ligante bituminoso inmediatamente seguido por la aplicación de un agregado. El agregado se apisona para incrustarlo en el bitumen. Se puede utilizar capas múltiples y varios tipos de aglutinantes y agregados para tratar daños específicos.

Los riegos de sello pueden colocarse con tratamiento superficial o con mortero asfáltico. En la primera opción, el ligante bituminoso a utilizarse puede ser cemento asfáltico AC 20 y AC 30 o una emulsión asfáltica. Así mismo, se recomienda que el agregado que cubre el asfalto sea núm. 3. Por otro lado, los riegos de sello con mortero asfáltico son muy adecuados para pavimentos de calles y aeropuertos y consisten en mezclar agregado fino, emulsión asfáltica, cemento portland o cal y agua para colocarlo en frío sobre las carpetas.

2.3.2.5. Morteros asfálticos

Los morteros asfálticos están compuestos por una mezcla que incluye emulsión asfáltica, agregado mineral o agregado pétreo, agua y diversos aditivos, debidamente dosificados, mezclados y colocados sobre la superficie preparada. El mortero asfáltico terminado deberá tener una textura y superficie homogénea, adherido a la superficie firmemente preparada y así poder tener una superficie resistente a deslizamientos durante su vida útil.

La Asociación Internacional de Mortero Asfáltico, reconoce tres tipos de agregados, cuya elección depende del objetivo del tratamiento:

- Tipo I fino = 1/8": se usa para máxima penetración en las grietas y como preparación para mezclas en caliente o sello convencional. Se usa en tráfico liviano.

- Tipo II General = 1/4": es el más usado y se emplea para sellar, corregir defectos, oxidación y pérdida de aglutinantes. Se utiliza en tráfico moderado y pesado.
- Tipo III Grueso = 3/8": se usa para corregir severos defectos en la superficie, resistencia al derrape y prevenir patinaje por agua.

Para que este tratamiento tenga éxito es necesario realizar pruebas empíricas en el laboratorio, es decir, preparar varias muestras variando el contenido de emulsión asfáltica y agua para determinar los efectos de los cambios en las características de mezclado, rompimiento y estabilización.

2.3.3. Micropavimentos

Los micropavimentos consisten en una sobrecapa delgada de 10 a 20mm. También se conoce como sistema MS – 1, consiste en una mezcla de emulsión catiónica de asfalto modificado con polímeros, agregados minerales de alta calidad, rellenos minerales, agua y otros aditivos que son tendidos sobre la superficie pavimentada.

La Asociación Internacional de Lechadas Asfálticas (ISSA) define a los micropavimentos como el tipo más avanzado o superior de lechada asfáltica, de mayor estabilidad. Este tratamiento se utiliza como un sello superficial para corregir irregularidades, tales como pérdida de propiedades anti-derrapantes, oxidación y desprendimientos en pavimentos. Así mismo, presenta varias ventajas similares a las de un recapeo asfáltico del tipo funcional.

El micropavimento debe ser considerado solo para aquellos pavimentos que poseen capacidad de carga remanente, necesaria para soportar las cargas de diseño vehicular.

2.3.4. Capa asfáltica de refuerzo en frío o caliente

Las fallas o deterioros en concreto asfáltico pueden ser tratadas de esta manera para mantener la carretera en buenas condiciones durante el tránsito de vehículos. Para la capa asfáltica en caliente se necesita la obtención y explotación de canteras y bancos; la trituración de piedra o grava, combinándola con arena de río y material de relleno para formar un material clasificado que cumpla con las especificaciones de pavimentos asfálticos en caliente.

La capa asfáltica en caliente es mejor conocido como recapeo, y consiste en la colocación de nueva capa de mezcla asfáltica, con el objetivo de reforzar la capa asfáltica existente, prolongar su vida útil y proveer una superficie lisa para el tránsito. Este mantenimiento debe emplearse cuando la superficie existente se está deteriorando o se presentan huellas, rugosidad, y otros.

Para una correcta aplicación del recapeo es importante limpiar las pequeñas depresiones del pavimento, y rellenarlas adecuadamente con material. Las depresiones más profundas deben excavar y reemplazarse con material nuevo. Si la capa de base debajo de un pavimento viejo, o la subrasante, se encuentran en mal estado, entonces se debe reparar. Las juntas desniveladas se deben emparejar, y las grietas se deben sellar.

La carpeta asfáltica de refuerzo en frío es una mezcla de agregado mineral no calentado y emulsión asfáltica o asfaltos cortados. Dentro de las ventajas que tiene este método sobre el refuerzo en caliente se encuentran las siguientes:

- Versatilidad: dada la variedad de tipos de emulsiones y asfaltos cortados disponibles.
- Economía: los equipos necesarios para la producción de mezcla son menos costosos que para la carpeta asfáltica en caliente.
- Baja contaminación ambiental: por el hecho de no requerir de un secador de agregados pétreos, no hay omisión de humo o polvo.

2.3.5. Bacheo superficial

El bache es la desintegración parcial o total de la superficie de rodadura que puede extenderse a otras capas del pavimento, con lo que se forma una 109 cavidad de bordes y profundidades irregulares. El procedimiento a realizarse para una correcta colocación de bacheo es el siguiente:

- Delimitar el área por remover, darle forma rectangular o cuadrada comprendiendo toda la zona deteriorada y hasta unos 0,30 metros dentro del pavimento circundante en buen estado.
- Cortar por líneas, que delimitan el área por remover dejando paredes verticales. Remover la mezcla hasta la profundidad en que se encuentre mezcla sana y sin grietas. En los baches alcanzar como mínimo hasta el punto más profundo.
- Colocar el imprimante o liga mediante escobillones a razón de 1,3 L/m².
- Antes de colocar la mezcla asfáltica verificar que la imprimación haya penetrado 10 mm en las bases granulares y que la emulsión para la liga haya quebrado.
- Extender la mezcla asfáltica mediante rastrillos y colocar la cantidad justa y necesaria para cubrir toda el área por rellenar y dejarla 6 mm sobresaliendo del pavimento circundante.

- Compactar con rodillo manual. El desnivel en los bordes no debe sobrepasar de 3 mm.

2.3.6. Fresado

El fresado consiste fundamentalmente en la trituración de una o varias capas del pavimento y en el extendido y compactación de ese mismo material con un tratamiento previo en el que se emplean emulsiones asfálticas y si fuera necesario cemento y/o una mezcla de áridos con determinada granulometría. Las capas obtenidas por este procedimiento pueden emplearse, bien como capas de base, o como capa definitiva de rodadura.

Figura 5. **Pavimentación con fresadora y pavimentadora**



Fuente: LEZCANO, Manuel. *Fresado de pavimento*

asfáltico. <https://prezi.com/hgjbmjvdfny/fresado-de-pavimento-asfaltico/>. Consulta: 01 de agosto de 2018.

El equipo necesario para realizar el fresado consta de un cilindro rotatorio, con dientes de especial dureza que remueve de 1 a 3 cm de pavimento asfáltico con la finalidad de alisar áreas deformadas con elevaciones y corrugaciones,

ahuellamientos menores, superficies agrietadas y disgregadas. Estos equipos cuentan con sistemas de nivelación automática y son capaces de operar con buena precisión. De este modo, los tiempos de trabajo se reducen considerablemente con un impacto mínimo en el tráfico. Otras ventajas del uso de este equipo son:

- El fresado puede restablecer el peralte.
- Restablece la pendiente correcta de la carretera.
- Puede eliminar puntos altos y rodadas.
- Es capaz de reducir o hasta eliminar las grietas por reflexión.
- Se puede lograr un mejor enrasamiento con el fresado que aplicando una capa niveladora de asfalto.
- Se logran ahorros considerables.
- Ahorro de agregados y ligantes.
- Ahorran energía.
- Son técnicas respetuosas con el medio ambiente.
- No alteran el perfil geométrico de la calzada.

Algunos de los campos de aplicación en donde puede realizarse un fresado son aquellas zonas en las que el pavimento está agrietado o con piel de cocodrilo para futura reposición. Así mismo, el fresado es útil para la realización de juntas de construcción de pavimentos nuevos con los ya existentes, y también para aligerar el peso necesario en los puentes en donde se va a reponer el pavimento.

2.4. Normatividad

A nivel nacional se adopta la siguiente normatividad:

- *American Section Of The International Association For Testing Materials (Astm), American Association Of State Highway And Transportation Officials (Aashto).*
- *Especificaciones Generales Para Construcción De Carreteras Y Puentes.*
 - División 400 pavimentos asfálticos.
 - Sección 403 mezcla asfáltica en frío.

2.5. Mezcla densa en frío

Es la mezcla de agregados pétreos nuevos mezclados en frío con material bituminoso, en la carretera o en planta para constituir la capa de superficie del pavimento o esta misma mezcla, combinada con agregados recuperados de una carpeta existente y material bituminoso para constituir la capa de base de una carpeta.

Este trabajo consiste en: la obtención y explotación de canteras o bancos de piedra o grava, usándolas en su estado natural, clasificadas o bien trituradas total o parcialmente cuando así se requiera en los planos o Disposiciones Especiales, combinándolas con agregados recuperados, arena o polvo de roca para producir un agregado clasificado; el apilamiento y almacenamiento de los agregados pétreos, el suministro, transporte y preparación de los mismos; el suministro, almacenamiento, acarreo, calentamiento y aplicación del material bituminoso; la ejecución de la mezcla; el transporte, colocación, curado, conformación y compactación de la mezcla asfáltica en frío; la regulación del tránsito; así como el control de laboratorio durante todas las operaciones necesarias para construir una capa de mezcla asfáltica en frío, en una o varias

capas, de conformidad con lo indicado en los planos y ajustándose a los alineamientos horizontal y vertical, y secciones típicas de pavimentación, dentro de las tolerancias estipuladas y de conformidad con estas Especificaciones Generales y Disposiciones Especiales.

2.6. Qué es un bache

Los baches son fallas localizadas en la superficie del pavimento, en forma de oquedades cóncavas, mayores de 15 cm de ancho en su longitud mínima. Es una porción del pavimento que ha sido removida y colocada con o sin material adicional después de la construcción original del pavimento. Estas fallas ocurren comúnmente dentro de un área reparada previamente.

Se pueden clasificar de la siguiente manera:

- De baja severidad: <1" de profundidad máxima
- De severidad media: <1" a 2" de profundidad máxima
- De alta severidad: > 2" de profundidad máxima

Cabe aclarar que la profundidad del bache es la profundidad máxima debajo de la superficie del pavimento, la cual se determina por medio de una inspección previa al tramo para estudiar la gravedad de la situación.

La manera de medirlos es registrando el número de baches en metros cuadrados del área afectada para cada nivel de severidad. Cuando un bache excede los 30 cm de profundidad es necesario el levantamiento de la carpeta asfáltica en la zona para la restauración de base.

2.6.1. Como se generan

Se crean por varios factores, y en una ciudad como Guatemala la más común es la filtración de agua en el pavimento. Cuando el agua se filtra de la capa de rodadura (asfalto, concreto hidráulico), por medio de grietas o fisuras, ésta se almacena en las capas inferiores denominadas capa base y sub-base.

La filtración de agua no es exclusivamente de agua de lluvia, sino también de mantos freáticos e incluso por el mal diseño del sistema de drenaje. La mayoría de los baches son provocados por esta problemática, pero también pueden ser creados por una carpeta asfáltica (pavimento) muy delgada e insuficiente para el tipo de vehículos que transitan la vía o incluso por la inadecuada compactación de las bases inferiores, capa de base, sub-base, subrasante cuando se está instalando el pavimento.

Los principales factores que originan los baches son:

- Daños por humedad
- Daños por fatiga
- Ciclos de hielo-deshielo
- Tránsito vehicular
- Mal drenaje
- Composición inadecuada de la mezcla asfáltica
- Desgranamiento superficial

2.6.2. Soluciones

Las soluciones más recomendadas son las siguientes:

- Mejor calidad de los materiales, el diseño y el proceso de construcción.
- Construir un drenaje adecuado.
- Capas estructurales aplicadas a tiempo para incrementar la resistencia del pavimento.
- Asfaltos modificados con polímeros.

2.7. Procedimiento para bacheo

Al rellenar toda excavación para reparación del pavimento existente cuya profundidad haya sido superior a ciento cincuenta milímetros (150 mm), los últimos setenta y cinco milímetros (75 mm) hasta alcanzar el nivel de la rasante existente se deberán rellenar con mezcla asfáltica, la cual se deberá compactar con el equipo adecuado hasta alcanzar la densidad especificada. El resto de la excavación se rellenará como se establece en los numerales correspondientes a bacheo de sub-base y base granulares en los Artículos 320 y 330, respectivamente.

Estos espesores podrán variar si así lo establecen los documentos del proyecto o lo autoriza el Interventor, en particular cuando se trate de labores de conservación y rehabilitación de pavimentos asfálticos antiguos con estructuras complejas.

Tanto la superficie que recibirá las capas asfálticas como las paredes de la excavación en contacto con ellas, deberán ser pintadas con un riego de liga, conforme a las instrucciones del interventor.

Como herramientas menores:

- Picotas, palas, carretillas.
- Cepillo o escoba para limpiar rastros y material suelto.
- Rastrillo afinador de madera o metal.
- Regadera y olla para almacenar ligante si es que no se dispone de un imprimador.

Procedimiento de trabajo:

- Los bordes verticales se perfilan con un cortador de pavimento, llegando hasta la base, donde exista material en buen estado.
- Se retira el material afectado, en caso de encontrarse con material con exceso de humedad o material suelto, remover el material y si el espesor lo amerita realizar cambio de material y realizar el debido compactado.
- Se limpia el hueco del bache retirando el polvo del fondo y las paredes verticales, incluso el área alrededor del bache ya cortado anteriormente.
- Se aplica un riego de liga, principalmente en las paredes verticales para sellar la intrusión de agua, también en los laterales para realizar el adecuado empalme.
- Se deposita la mezcla de bacheo uniformemente con el rastrillo o afinador, la mezcla debe estar a temperatura de aplicación para una mejor adherencia y cohesión de las partículas del material.

- Se compacta con rodillo o placa vibratoria a la densidad necesaria.

2.8. Procedimiento de ensayo

A continuación se describe brevemente los ensayos a los que son sometidas las probetas para la obtención de los diferentes resultados a analizar.

2.8.1. Gravedad específica bruta

La prueba de gravedad específica puede desarrollarse tan pronto como el espécimen se haya enfriado en un cuarto de temperatura. Esta prueba se hace de acuerdo con la Norma ASTM D 1188, gravedad específica de mezclas asfálticas compactadas utilizando parafina; o la ASTM D 2726, gravedad específica de mezclas asfálticas compactadas mediante superficies saturadas de especímenes secos. Para determinar cuál norma se debe utilizar, se realizan pruebas de absorción a la mezcla asfáltica compactada; si la absorción es mayor al 2 %, se recurre a la norma ASTM D 1188; en caso contrario, se emplea la norma ASTM D 2726.

2.8.2. Gravedad específica teórica máxima

Se determina la gravedad específica teórica máxima G_{mm} de acuerdo a la norma AASHTO T 209-05, de la mezcla asfáltica en su estado suelto, para al menos dos contenidos de asfalto; de preferencia en un rango en donde se estime que podrá encontrarse el contenido óptimo. Una vez hecho lo anterior, se pueden determinar los valores de G_{mm} para los distintos contenidos de asfalto que se utilizan en el diseño, empleando fórmulas de aproximación tal como lo describe el Instituto del Asfalto de Norteamérica en su Manual de Métodos de Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente.

2.8.3. Porcentaje de vacíos-densidad

Después de completar las pruebas de estabilidad y flujo, se realiza el análisis de densidad y vacíos para cada serie de especímenes de prueba. Resulta conveniente determinar la gravedad específica teórica máxima (AASHTO T 209) para al menos dos contenidos de asfalto, preferentemente aquellos que estén cerca del contenido óptimo de asfalto. Un valor promedio de la gravedad específica efectiva del total del agregado se calculará de estos valores.

Utilizando la gravedad específica y la gravedad específica efectiva del total del agregado; el promedio de las gravedades específicas de las mezclas compactadas; la gravedad específica del asfalto y la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica, se calcula el porcentaje de asfalto absorbido en peso del agregado seco, porcentaje de vacíos (Va); porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA) y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).

2.8.4. Prueba de estabilidad-flujo Método tradicional

De acuerdo con el *Asphalt Institute*, el concepto del método Marshall en el diseño de mezclas para pavimentación fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi.

El Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall, a la vez que desarrolló un criterio de diseño de mezclas.

Tabla III. **Normas de ensayos**

Norma		Descripción
ASTM D 2726	AASHTO T 166	Gravedad específica Bruta
ASTM D 2041	AASHTO T 209	Gravedad específica teórica máxima
ASTM D 3203	AASHTO T 269	Porcentaje de vacíos de aire
ASTM D 1559	AASHTO T 245	Estabilidad y flujo Marshall

Fuente: elaboración propia.

2.8.4.1. **Diseño de mezclas ASTM D 1559**

El diseño de mezclas por el Marshall, nos permite determinar el porcentaje óptimo de contenido de asfalto de la mezcla. Para ello se debe realizar el siguiente procedimiento:

- Determinar la gravedad específica *Bulk* de los agregados.
- Determinar la gravedad específica teórica máxima de la mezcla compactada.
- Determinar gravedad específica efectiva de los agregados.
- Determinar la gravedad específica teórica máxima *Rise*.
- Determinar los vacíos de aire en la mezcla compactada.
- Determinación de los vacíos de aire en el agregado mineral.
- Determinar los vacíos llenos con asfalto.
- Determinar el volumen de asfalto absorbido.

- Determinación del contenido óptimo de asfalto.

2.9. Materiales

- Agregados Pétreos

Los agregados pétreos deben consistir en piedra o grava de buena calidad, solamente clasificados sin triturar, o cuando así lo requieran las Disposiciones Especiales y los planos, deberán triturarse combinando el producto obtenido, con agregados recuperados, si así se requiriera en las Disposiciones Especiales, arena pétreo y polvo de roca, naturales o de trituración, según el caso.

Tabla IV. **Requisitos de los agregados pétreos**

Ensayo	Porcentaje (%)
Abrasión, AASHTO T 96	40 máximo
Desintegración al sulfato de sodio, (5 ciclos), AASHTO T 104	15 máximo
Caras fracturadas, 1 cara	40 mínimo ^(*)
Partículas planas o alargadas, ASTM D 4791	15 máximo ^(*)
Equivalente de arena. AASHTO T 176	35 mínimo
Índice Plástico, AASHTO T 90	6 máximo
Límite Líquido, AASHTO T 89	25 máximo

^(*) Si en las Disposiciones Especiales se requiere trituración total o parcial de los agregados minerales.

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. p. 403-1.

- Impurezas

El agregado no debe contener materias vegetales, basura, terrones de arcilla, o sustancias que incorporadas dentro de la mezcla asfáltica en frío con piedra o grava puedan producir fallas en el pavimento.

- Graduación

El agregado pétreo, listo para ser mezclado con material bituminoso, debe cumplir con los requisitos de graduación determinada según AASHTO T 11 y T 27, para uno de los tipos establecidos, según se indique en las Disposiciones Especiales y de acuerdo con la tabla IX.

- Polvo Mineral

Cuando se necesite agregar polvo mineral en adición al que se encuentra naturalmente en el agregado, este debe cumplir con los requisitos establecidos en la tabla V.

Cuando se necesite agregar polvo mineral como ingrediente separado, en adición al que contiene el agregado pétreo después de su trituración, este debe consistir en: polvo de roca, cemento hidráulico, cal hidratada u otro material inerte no absorbente, que llene, según AASHTO M 17, los requisitos siguientes:

Tabla V. **Requisitos de graduación para el polvo mineral**

Estándar mm	Tamiz No.	Porcentaje total que pasa un tamiz de abertura cuadrada (AASHTO T 37)
0,600	30	100 %
0,300	50	95-100 %
0,075	200	70-100 %

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

- Material Bituminoso
 - Asfaltos líquidos

Los asfaltos líquidos están compuestos por cemento asfáltico diluidos en solventes de evaporación rápida (RC, que gradualmente están cayendo en desuso), mediana (MC) o lenta (SC). Generalmente los solventes en los asfaltos líquidos de curado rápido consisten en gasolinas o naftas, en los de curado medio consiste en kerosén y en los de curado lento consisten en aceites de baja volatilidad.

- Emulsión asfáltica

Las emulsiones asfálticas están formadas de tres ingredientes básicos: cemento asfáltico (AC), agua y agente emulsivo. Se le podrán agregar aditivos a las emulsiones asfálticas, tales como estabilizadores, aditivos antidesvestimiento, aditivos para el control del fraguado o polímeros para mejorar las propiedades reológicas del asfalto.

Existen dos tipos de emulsiones: las aniónicas, las cuales tienen cargas electroquímicas negativas y las catiónicas, con cargas electroquímicas positivas. En principio, las emulsiones aniónicas tienen mayor afinidad con agregados pétreos con cargas positivas, tales como agregados ricos en carbonato de calcio, mientras que las emulsiones catiónicas cubren mejor a los agregados pétreos de tipo sílico.

Las emulsiones se clasifican de acuerdo al tiempo de fraguado de las mismas, siendo éstas RS, MS, SS y QS, que significan de fraguado rápido, medio, lento y ultra-rápido, respectivamente. Las emulsiones asfálticas utilizadas en la mezcla asfáltica en frío deben cumplir con lo establecido en el numeral 2) de la Tabla VI.

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

Tipo y grado de material bituminoso	Especificación AASHTO	Temperatura en °C para mezclas en planta	Temperatura de aplicación en °C para mezclas en carretera
1) Asfaltos líquidos MC y SC	M 82 y 141	<u>Temperatura de la mezcla</u>	
• 250			>40
• 800		55-80	>55
• 3 000		75-100	-
		80-115	

Continuación de la tabla VI.

2)Emulsiones Asfálticas		<u>Temperatura de la emulsión</u>	
Aniónicas	M 140	10-70	20-70
<ul style="list-style-type: none"> • MS-2, MS-2h • SS-1, SS-1h • HFMS-2, HFMS-2h, HFMS-2s 			
Catiónicas	M 208	10-70	20-70
<ul style="list-style-type: none"> • CMS-2, CMS-2h • CSS 1, CSS-1h 			

Nota: La tabla anterior sirve para indicar los rangos de temperatura necesarios para proporcionar la viscosidad del asfalto adecuada para su esparcimiento. Debe reconocerse que los rangos de temperatura indicados están arriba del mínimo punto de llama para los asfaltos líquidos. En realidad algunos asfaltos pueden tener puntos de llama a temperaturas inferiores de los rangos aquí indicados, es por ello que deben tomarse precauciones de seguridad adecuadas todo el tiempo cuando se trabaje con asfaltos líquidos. Estas precauciones de seguridad incluyen pero no están limitadas a lo siguiente:

1. No se debe permitir la existencia de llamas o chispas cerca de estos materiales. El control de temperatura debe efectuarse en mezcladoras, distribuidoras u otro equipo diseñado y aprobado para este propósito.
2. Nunca deben usarse llamas para examinar los tambores, tanques de asfalto u otros contenedores en los que se hayan almacenado estos materiales.
3. Todos los vehículos que transporten estos materiales deben ser ventilados adecuadamente.
4. Únicamente el personal con experiencia podrá supervisar y manipular estos materiales.

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes.* p. 403-3.

El material bituminoso que se utiliza en las mezclas en frío depende de varios factores. Depende del procedimiento de elaboración: si es elaborada en

planta central o en la carretera. Depende del uso que se le vaya a dar a la mezcla; como material para capa asfáltica o como material para bacheo. Para capa asfáltica, depende del tipo de graduación de los agregados; si es cerrada o abierta. Para bacheo, depende del tiempo en que se vaya a utilizar la mezcla; de inmediato o si se va a apilar para uso posterior.

Se debe tomar en cuenta todos estos factores y escoger el material bituminoso para la elaboración de la mezcla asfáltica para que cumpla con lo establecido en la tabla VII.

Tabla VII. **Requisitos para los materiales bituminosos según su aplicación**

Tipo de Aplicación de la Mezcla en Frío	Asfaltos Líquidos						Emulsiones Asfálticas					
	Curado Medio (MC)			Curado Lento (SC)			Aniónicas				Catiónicas	
	250	800	3 000	250	800	3 000	MS-2, HFMS-2	MS-2h, HFMS-2h	HFMS-2s	SS-1, SS-1h	CMS-2, CMS-2h	CSS-1, CSS-1h
Mezclas elaboradas en Planta Central												
Mezclas para capas de base y de superficie asfáltica												
• Graduación abierta							X	X			X	
• Graduación cerrada	X	X	X	X		X			X	X		X
Mezclas para Bacheo												
• Bacheo, uso inmediato	X	X			X					X		X
• Bacheo, apilamiento	X	X		X	X							

Continuación de la tabla VII.

Mezclas elaboradas en Carretera												
Mezclas para capas de base y de superficie asfáltica												
• Graduación abierta		X	X		X	X	X	X			X	
• Graduación cerrada	X	X		X	X				X	X		X
Mezclas para Bacheo												
• Bacheo, uso inmediato	X	X			X				X	X		X
• Bacheo, apilamiento	X	X		X	X							

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. p. 403-4.

2.10. Preparación de una mezcla en frío

Previamente a la iniciación de los trabajos de construcción de mezcla asfáltica en frío, el contratista debe someter a conocimiento del Delegado Residente, el procedimiento incluyendo la maquinaria, equipo y materiales que utilizará para las operaciones de producción, acarreo, colocación, curado, tendido y compactación de la mezcla asfáltica en frío, de acuerdo con las características de los materiales y los requisitos que establecen estas Especificaciones Generales y Disposiciones Especiales.

Se decidió fabricar la mezcla densa en frío, para propósitos de esta investigación; la selección obedece a que es la mezcla que se puede usar en espesores de 5 a 10 cm, siendo la mezcla más usada por la versatilidad de utilizar como base asfáltica o rodadura asfáltica. Para el caso de bacheos se comporta muy bien.

Continuación de la tabla VIII.

1. Con emulsión asfáltica	50 %	
2. Con asfalto líquido	75 %	
• Porcentaje de vacíos relleno con asfalto	65	80

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes*. p. 403-4.

2.10.2. Determinación de agregado grueso y fino

A continuación, se presenta la determinación del agregado grueso y fino.

2.10.2.1. Agregado grueso

El agregado grueso deberá proceder de la trituración de roca o de grava o por una combinación de ambas; sus fragmentos deberán ser limpios, resistentes y durables, sin exceso de partículas planas, alargadas, blandas o desintegrables.

Estará exento de polvo, tierra, terrones de arcilla u otras sustancias objetables que puedan impedir la adhesión completa del asfalto.

2.10.2.2. Agregado fino

El agregado fino deberá proceder en su totalidad de la trituración de piedra de cantera o de grava natural, o parcialmente de fuentes naturales de arena.

2.10.3. Determinación del tipo de emulsión

Una vez obtenidas las características de los materiales pétreos se procede a determinar la emulsión más adecuada para cada caso. Se tomará en cuenta la clasificación petrográfica para determinar qué tipo de emulsión se debe emplear. La emulsión elegida para esta investigación es CSS-1h, tabla VI, (tipo catiónico de rompimiento lento), ya determinada el tipo de emulsión, se procede a calcular el asfalto óptimo que se va a emplear en la mezcla.

2.10.4. Cálculo del porcentaje óptimo teórico de asfalto en una mezcla

El porcentaje teórico de ligante se puede calcular por medio de varios métodos; se mostrarán los más utilizados.

2.10.4.1. Método del Laboratorio Central de Puentes y Caminos en Francia (LCPC)

Este cálculo teórico requiere que se evalúe la superficie específica (S.E.) del material pétreo y conocer el tipo de pavimento donde se va a emplear. Para el caso de este estudio, únicamente se va a considerar el caso de las mezclas más comúnmente empleadas, es decir, el valor de riqueza será constante. Para determinar la S.E. (en m^2/kg).

2.10.4.2. Método del Instituto del asfalto (EU)

Este método está publicado en la edición del Manual del Asfalto y da directamente el porcentaje óptimo teórico de cemento asfalto con respecto a la mezcla total.

2.10.4.3. Método de diseño Marshall Modificado

El método Marshall fue ideado para diseñar las mezclas en caliente por Bruce Marshall, ex Ingeniero de Bitúmenes del Departamento de Carreteras del Estado de Mississippi, pero con ciertas adaptaciones en la metodología de la prueba, se pueden obtener buenos resultados en la mezcla con emulsión.

Determinación del porcentaje de agua de mezclado. Para poder mezclar el agregado pétreo con la emulsión, es muy importante que el agregado pétreo tenga la humedad adecuada; esta humedad se obtuvo por tanteo: se comienza partiendo de una cantidad de agua (H_i) con la cual el material presenta un aspecto húmedo total pero sin tener agua libre.

Hay algunos materiales, especialmente las calizas, que con muy pequeñas cantidades de agua es suficiente para tener una buena mezcla.

2.10.5. Colocación y compactación

La mezcla asfáltica debe ser uniformemente compactada hasta alcanzar el 100 % de la densidad máxima de laboratorio según el numeral 2.10.1. La

compactación en el campo se comprobará de preferencia según AASHTO T 230. Con la aprobación escrita del Ingeniero pueden usarse otros métodos técnicos, incluyendo los no destructivos.

Cuando el espesor a construir excede de 100 milímetros, el material debe colocarse, tenderse y compactarse en dos o más capas, de espesor no menor del doble del tamaño máximo del agregado.

Siempre que se efectúe la construcción en varias capas debe colocarse un riego de liga entre las mismas, de acuerdo con la Sección 408 de la Dirección General de Caminos. Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes, cuando la capa inferior haya sido abierta al tránsito antes de ser cubierta con otra capa.

La compactación se deberá efectuar desde los lados hacia el centro, en dirección paralela a la línea central de la carretera.

2.10.6. Extracción de núcleos y muestras tipo pastillas.

Para minimizar la distorsión de las capas asfálticas compactadas, se deben emplear equipos motorizados para garantizar las muestras. El equipo puede ser un taladro saca-núcleos, como se muestra en la figura 7.

Figura 6. **Taladro saca-núcleos**



Fuente: Secciones 700 y 800 – *Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos*, INV E-758-13.

Las muestras que se tomen con un equipo saca-núcleos deberán tener un diámetro nominal mínimo de 100 mm (4") y abarcar todo el espesor de la capa que se muestrea.

Si se considera que los resultados de los ensayos son erráticos o presentan algún sesgo atribuible al tamaño de la muestra, será necesario tomar muestras de mayor diámetro. Con el fin de disminuir el deterioro del testigo, se deberá emplear algún dispositivo apropiado para su extracción.

Cuando los testigos cilíndricos se van a emplear en la determinación de los módulos dinámicos o resilientes, las muestras deberán conformar cilindros

perfectos con sus bases perpendiculares al eje. Todas las muestras deberán satisfacer los requisitos exigidos por el respectivo método de ensayo.

Para separar la muestra de la capa subyacente, se deberá insertar en el corte ejerciendo una presión suave hacia la muestra, sin intentar hacer palanca hacia arriba. Si la liga con la capa inferior no se rompe, será necesario extraer el núcleo en el espesor total de las capas que estén ligadas.

Para remover la muestra del orificio, se inserta cuidadosamente en el corte el dispositivo, se gira unos 90° y se levanta suavemente hasta que el testigo pueda ser sujetado con la mano.

Figura 7. **Dispositivo para extraer un núcleo de pavimento**



Fuente: Secciones 700 y 800 – *Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos*,
INV E-758-13.

2.11. Ventajas

Facilidad en la preparación de la mezcla en sitio, pues no es necesario el uso de plantas en caliente.

Ambientalmente presenta unas ventajas enormes con respecto a las mezclas en caliente tales como: eliminación del riesgo de incendio, ahorro de energía en la fabricación de la mezcla, poca emisión de gases y evita la oxidación del asfalto al ser calentado a altas temperaturas en las mezclas en caliente.

Con viscosidades en el rango de 0,5 a 10 poises a 60°C, la emulsión asfáltica tiene mucha menor viscosidad que el cemento asfáltico (100 - 4 000 poises) lo que permite ser utilizado a temperaturas bajas.

Lo agregados se pueden mezclar húmedos, ahorrando energía en el secado, para la colocación se puede mezclar y extender con una moto niveladora pudiéndose utilizar para pendientes fuertes, mientras que la pavimentadora no es eficiente en pendientes fuertes.

2.12. Limitaciones

A pesar que las mezclas en frío emulsionadas se vienen trabajando desde la década de los noventa en Guatemala, la información no obstante respecto a estas no está totalmente a disposición pública.

Consecuentemente, las visitas al laboratorio de las diferentes empresas que manejan la emulsión CSS1h, estarán sujetas al dinamismo interno de esta, obviamente se usará el equipo de laboratorio que la misma requiere en su

desempeño, de ahí que, se realizaran las pruebas mínimas necesarias para obtener un diseño de mezcla funcional, teniendo el tino de no afectar los resultados de la investigación ni interferir en las actividades de laboratorio de la misma.

El documento a desarrollar no incluirá el análisis y diseño de las subcapas de una carretera (base y sub-base) ya que, el método Marshall establece los criterios y parámetros (compactación, estabilidad, flujo, porcentaje de vacíos) que debe cumplir una carpeta de rodadura así como la base sobre la cual se colocara esta.

El trabajo a realizar únicamente llevará la información para realizar el proceso del Diseño de Mezcla Asfáltica Densa en Frío el cual estará basado en el método Marshall Modificado.

3. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

3.1. Caracterización de la mezcla

El diseño de la mezcla asfáltica en frío, parte de la graduación de agregados indicada en la Norma AASHTO T 11 y AASHTO T 27. En esta se presentan los valores máximos y mínimos en los cuales debe estar comprendida la curva granulométrica de los agregados de la mezcla.

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

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

Se determinará dependiendo que tipo de granulometría, en nuestro caso una C-2 del tipo "C" con un agregado máximo de 3/4", esta granulometría nos indica una mezcla en frío densa. También por la exigencia de capacidad de soporte.

Tabla IX. **Tipos de graduación para mezclas asfálticas en frío (Manual MS-4 Instituto Asfalto) ***

Estándar mm	Tamiz N°	Porcentaje por peso que pasa un tamiz de abertura cuadrada (AASHTO T 11 y 27)							
		TIPO "A" 38,1 mm (1 1/2") máximo		TIPO "B" 25 mm (1") máximo		TIPO "C" 19 mm (3/4") máximo		TIPO "D" 12,5 mm (1/2") máximo	
		A-1*	A-2*	B-1*	B-2*	C-1	C-2*	D-1*	D-2*
38,1	1 1/2"	100	100						
25,0	1"	95-100	90-100	100	100				
19,0	3/4"	-	-	90-100	90-100	100	100		
12,5	1/2"	25-60	60-80	-	-	90-100	90-100	100	100
9,5	3/8"	-	-	20-55	60-80	-	-	85-100	90-100
4,75	4	0-10	25-60	0-10	35-65	0-15	45-70	-	60-80
2,36	8	0-5	15-45	0-5	20-50	0-5	25-55	-	35-65
1,18	16	-	-	-	-	-	-	0-5	-
0,300	50	-	3-18	-	3-20	-	5-20	-	6-25
0,075	200	0-2	1-7	0-2	2-8	0-2	2-9	0-2	2-10

Nota: Si se usa un tipo de graduación abierta, como A-1, B-1, C-1 ó D-1 o si el porcentaje de vacíos con aire de la mezcla compactada excede de 8 %, la mezcla asfáltica en frío debe ser recubierta con un sello asfáltico según la Sección 405, o bien con un tratamiento asfáltico superficial simple de acuerdo a la Sección 404. Las graduaciones A-2, B-2, C-2 y D-2 son graduaciones densas o cerradas.

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. p. 403-2.

En la tabla X 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.

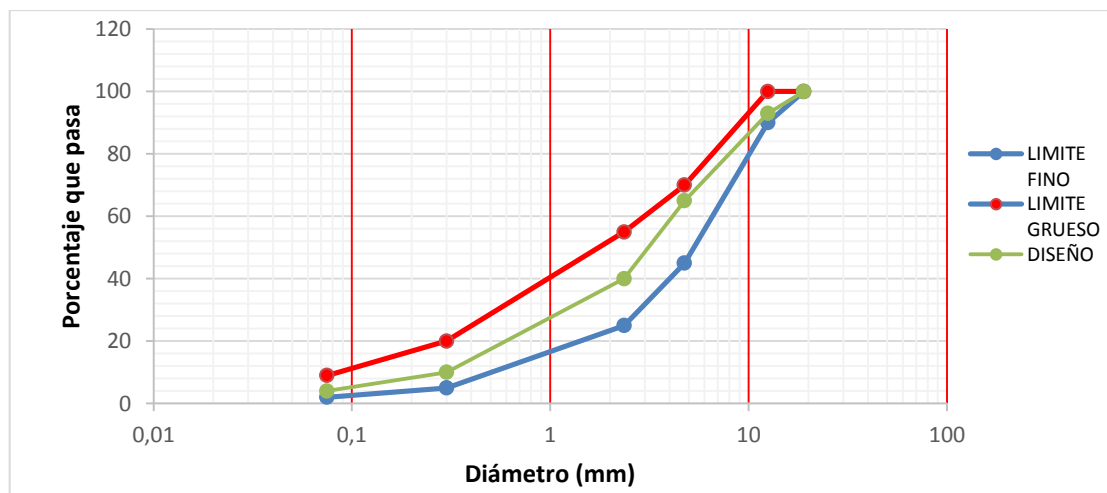
Cada mezcla asfáltica debe de contener un peso total de 1 200 g. de agregados pétreos.

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

No. TAMIZ	ABERTURA (mm)	DISEÑO	PORCENTAJE RETENIDO INDIVIDUAL	CANTIDAD EN PESO PARA LA MEZCLA (g)	
3/4"	19	100			
1/2"	12,5	93	7	84	
# 4	4,75	65	28	336	
# 8	2,36	40	25	300	
# 50	0,3	10	30	360	
# 200	0,075	4	6	72	
Fondo				4	48
Total					1 200

Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Curva granulométrica del diseño de mezcla asfáltica**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

3.2. Gravedad específica *Bulk*

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

3.2.1. 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 9. **Balanza provista de dispositivo de suspensión**



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

Figura 10. **Pileta con agua para suspensión de probeta**



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

3.2.2. Procedimiento

A continuación se muestra el procedimiento para determinar la gravedad específica *bulk* de la mezcla compactada.

- 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)

3.3. 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.

3.3.1. 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 11. **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.

Figura 12. **Picnómetro para vacío y balanza**



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

3.3.2. **Procedimiento**

A continuación se muestra el procedimiento para determinar la gravedad específica teórica máxima de la mezcla compactada.

- 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)

3.4. 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.

3.4.1. 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*.

3.4.2. Procedimiento

A continuación se muestra el procedimiento para determinar el porcentaje de vacíos-densidad de la mezcla compactada.

- 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

3.5. Prueba de estabilidad-flujo Método tradicional

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

3.5.1. 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

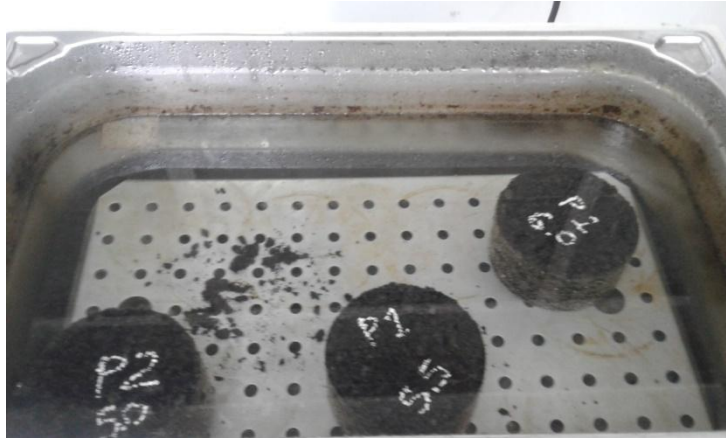
probetas compactadas. Debe tener un control termostático que le permita mantener la temperatura en cualquier punto del tanque.

Figura 13. **Anillo dinamométrico, deformímetro de lectura fija. Dispositivo de compresión para rotura de probetas**



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.

3.5.2. 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).

3.6. Experiencias sobre el curado de mezclas asfálticas en frío

El curado de las briquetas se realiza como sigue:

Se dejan dentro del molde de compactación a temperatura ambiente por un lapso mínimo de 18 horas, cuidando que la ventilación sea uniforme para ambas caras de la probeta, luego se extraen del molde con la ayuda de un dispositivo adecuado de extracción “gato hidráulico”. Luego se dejan veinticuatro (24) horas dentro del horno a una temperatura de 38 °C.

3.6.1. Ensayo de inmersión y vacío parcial

A continuación, se presenta el procedimiento detallado del ensayo de inmersión y vacío parcial.

3.6.1.1. Procedimiento

- Se sumergen las diez muestras (2 por cada contenido de asfalto residual), en un desecador y se aplica una presión de vacíos constante de 100 mm de mercurio (Hg) durante una (1) hora, luego se disminuye en una hora adicional a razón de 25 mm de mercurio (Hg) cada quince (15) minutos, hasta llegar de nuevo a la presión atmosférica.
- Se sacan las probetas del desecador y se dejan al aire por un lapso de (1) hora y se ensayan en la prensa Marshall de acuerdo al Método de prueba Modificada para determinar la estabilidad y flujo de cada una de ellas.
- Se determina el peso de las probetas, una vez que estas hayan sido falladas, y se colocan en el horno para su secado por veinticuatro (24) horas a temperatura de 100 ± 5 °C.
- Se registran los datos obtenidos y se determina la pérdida de estabilidad comparando los valores obtenidos de las probetas falladas al aire con los valores de las probetas falladas después de inmersión y vacío parcial.

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1. Fabricación de probetas de mezcla con emulsión asfáltica

Antes de fabricar las probetas se procede a realizar un cuarteo de material. Para fabricar 1 briqueta se necesita 1 200 gramos de agregados pétreos, el diseño propuesto se puede observar en la tabla X.

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

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

Figura 15. **Mezcla de los agregados pétreos junto con emulsión asfáltica**



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

Figura 16. **Probetas compactadas**



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

4.1.1. Procedimiento

- Colocar la arena y la grava en una tara y mezclar uniformemente.
- Colocar la tara con la mezcla en la balanza y agregar el agua calculada en gramos.
- Mezclar hasta que la mezcla tenga un color uniforme.
- Agregar la emulsión asfáltica calculada en gramos.
- Mezclar los agregados con la emulsión durante 90 segundos (metodología Marshall), hasta obtener una mezcla completa y homogénea.
- Pesar la mezcla y esperar a que pierda el 1 % de humedad a temperatura ambiente (metodología Marshall).

- 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, con el fin de un mejor acomodo de las partículas de la mezcla en el molde.
- Colocar el molde con la mezcla en el martillo Marshall, para luego proceder a la compactación, procurando darle de forma constante 75 golpes por cada cara. Inmediatamente se procede al curado de la briqueta dentro del molde en un período de 24 horas. Pasado este periodo desmoldar la briqueta con ayuda del gato hidráulico.

4.2. Caracterización del tipo de emulsión

La caracterización de la emulsión que se utilizó en este diseño de mezcla no se realizó, ya que para emulsificar el asfalto se requiere de una buena dosis de pericia en los ensayos, aparte de la manipulación de instrumentos complejos y de limitada existencia en los laboratorios del plantel, por tales motivos, se acordó tomar un tipo de emulsión fabricada por los técnicos de los laboratorios de la empresa PADEGUA, S.A., No obstante, la norma que ampara cada ensayo para la caracterización, se presenta a continuación:

- Ensayo residuo por destilación (ASTM D 244, AASHTO T 59)
- Ensayo residuo por evaporación (ASTM D 244)
- Ensayo de sedimentación (ASTM D 244)
- Ensayo de la carga eléctrica (ASTM D 244)
- Viscosidad saybolt furol (ASTM D 244)
- Tamizado de las emulsiones asfálticas en la malla # 20 (ASTM D 244)

- Ensayo determinación del potencial de hidrógeno (ph) (ASTM D 244)
- Ensayo de miscibilidad con agua (ASTM D 244)

Figura 17. **Preparación de la emulsión asfáltica**



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

4.3. Cálculo de porcentaje óptimo teórico de asfalto en una mezcla

La estimación del porcentaje óptimo de asfalto es de una gran ayuda, y se realiza utilizando la relación propuesta por el Instituto del Asfalto, ya que proporciona un valor de asfalto óptimo teórico y a partir de este se establecen los demás porcentajes de asfalto para el diseño.

Relación propuesta por el Instituto del Asfalto:

$$P = 0,032a + 0,045b + K.c + n$$

Donde:

P = porcentaje de asfalto estimado por peso total de la mezcla

a = porcentaje de material pétreo retenido en el tamiz No. 10

b = porcentaje de material que pasa el tamiz No. 10 y se retiene en la No.
200

c = porcentaje de material que pasa la malla No. 200

K = factor que depende del valor de "c" (0.5)

n = varía según el tipo de material pétreo y su absorción

4.4. Gravedad específica *Bulk*

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

4.4.1. Cálculos, datos y presentación de resultados

Ejemplo de cálculo:

Datos:

Probeta 1 = 4 % de emulsión

Probeta 1 = 4 % de agua

A = 1 248,38 g

B = 1 250,91 g

C = 690,54 g

$$G_{mb} = \frac{1\ 248,38}{1\ 250,91 - 690,54} = 2,228$$

Tabla XI. **Datos de los resultados de gravedad específica *bulk***

Porcentaje de emulsión asfáltica y agua	Probeta	A (g)	B (g)	C (g)	G _{mb}	G _{mb}
4,00	1	1 248,38	1 250,91	690,54	2,228	2,226
	2	1 246,83	1 248,76	688,10	2,224	
4,5	1	1 247,17	1 250,09	686,83	2,214	2,214
	2	1 250,38	1 252,82	688,15	2,214	
5,00	1	1 246,36	1 250,50	682,03	2,192	2,199
	2	1 247,75	1 251,57	685,74	2,205	
5,5	1	1 245,12	1 252,58	687,95	2,205	2,197
	2	1 245,67	1 256,48	687,15	2,188	
6,00	1	1 244,19	1 250,76	679,60	2,178	2,187
	2	1 242,06	1 248,01	682,30	2,196	
6,50	1	1 240,19	1 248,51	678,32	2,175	2,177
	2	1 241,20	1 249,06	679,34	2,179	
7,00	1	1 239,68	1 248,56	675,56	2,163	2,156
	2	1 231,39	1 242,39	669,10	2,148	

Fuente: elaboración propia.

Nota: para obtener los valores que representan la G_{mb} se tomó en cuenta el promedio de las dos probetas ensayadas para cada uno de los porcentajes de la emulsión asfáltica.

4.5. 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.

4.5.1. Cálculos, datos y presentación de resultados

Ejemplo de cálculo:

Datos:

Probeta 1 = 4 % de emulsión

Probeta 1 = 4 % de agua

$$A = 1\ 247,61\ \text{g}$$

$$D = 7\ 379,50\ \text{g}$$

$$E = 8\ 100,60\ \text{g}$$

$$G_{mb} = \frac{1\ 247,61}{1\ 247,64 + 7\ 379,50 - 8\ 100,60} = 2,370$$

Tabla XII. **Datos de los resultados de gravedad específica teórica máxima**

Porcentaje de emulsión asfáltica y agua	Probeta	A (g)	D (g)	E (g)	Gmm
4,00	Mezcla asfáltica	1 247,61	7 379,50	8 100,60	2,370
4,50	Mezcla asfáltica	1 248,78	7 380,50	8 097,60	2,349
5,00	Mezcla asfáltica	1 247,06	7 379,10	8 093,60	2,342
5,50	Mezcla asfáltica	1 245,40	7 378,20	8 092,60	2,345

Continuación de la tabla XII.

6,00	Mezcla asfáltica	1 243,13	7 382,20	8 089,60	2,320
6,50	Mezcla asfáltica	1 240,70	7 380,20	8 088,60	2,331
7,00	Mezcla asfáltica	1 235,54	7 379,50	8 085,60	2,334

Fuente: elaboración propia.

4.6. 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.

4.6.1. Cálculos, datos y presentación de resultados

Ejemplo de cálculo:

Datos:

Probeta 1 = 4 % de emulsión

Probeta 1 = 4 % de agua

$$G_{mm} = 2,370$$

$$G_{mb} = 2,226$$

$$V_A = \frac{2,370 - 2,226}{2,370} \times 100 = 6,07 \%$$

Tabla XIII. **Datos de los resultados de porcentaje de vacíos**

Porcentaje de emulsión asfáltica y agua	Probeta	Gmm	Gmb	VA (%)
4,00	Mezcla asfáltica	2,370	2,226	6,07
4,50	Mezcla asfáltica	2,349	2,214	5,73
5,00	Mezcla asfáltica	2,342	2,199	6,10
5,50	Mezcla asfáltica	2,345	2,197	6,35
6,00	Mezcla asfáltica	2,320	2,187	5,75
6,50	Mezcla asfáltica	2,331	2,177	6,61
7,00	Mezcla asfáltica	2,334	2,156	7,63

Fuente: elaboración propia.

4.7. Prueba de estabilidad-flujo Método tradicional

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

4.7.1. Cálculos, datos y presentación de resultados

Ejemplo de cálculo:

Datos:

Probeta 1 = 4 % de emulsión

Probeta 1 = 4 % de agua

Lectura anillo dinamométrico: 43 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.

$$43 \text{ delft} = 458,28 \text{ lbf}$$

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

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

$$\text{Volumen} = 1\,250,91 - 690,54 = 560,37 \text{ cm}^3$$

Para el volumen de $560,37 \text{ cm}^3$ equivale un factor de corrección de 0,86. Por lo tanto, el valor de estabilidad corregido sería:

$$\text{Estabilidad} = (458,28)(0,86) = 394,12 \text{ lbf}$$

Tabla XIV. **Datos de los resultados de estabilidad-flujo**

Porcentaje de emulsión asfáltica y agua	Probeta	Flujo (0,01")	Carga (delft)	Estabilidad (lbf)	Factor de corrección (lbf)	Estabilidad corregida (lbf)
4,00	1	8	150	1 425,48	0,86	1 225,91
	2	7	160	1 519,78	0,86	1 307,01
4,50	1	8	155	1 472,63	0,86	1 266,46
	2	9	160	1 519,78	0,86	1 307,01
5,00	1	11	173	1 643,53	0,86	1 413,43
	2	9	180	1 709,33	0,86	1 470,03

Continuación de la tabla XIV.

5,50	1	12	185	1 756,49	0,86	1 510,58
	2	13	190	1 803,64	0,86	1 551,13
6,00	1	15	225	2 134,96	0,86	1 836,07
	2	13	230	2 182,12	0,86	1 876,62
6,50	1	18	200	1 898,73	0,86	1 632,91
	2	16	220	2 087,81	0,86	1 795,52
7,00	1	17	190	1 803,64	0,86	1 551,13
	2	20	210	1 993,51	0,86	1 714,42

Fuente: elaboración propia.

Nota: El porcentaje de emulsión asfáltica y agua, es respecto al peso total de agregados pétreos de la briqueta en gramos.

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. Comparación con otros estudios realizados

Con base a los resultados obtenidos, en los diferentes ensayos realizados en el laboratorio y comparando dichos resultados con otro trabajo de investigación muy similar, realizado en Santa Ana, El Salvador, que lleva como título *Diseño de mezclas asfálticas densas en frío basado en el método Marshall modificado de la universidad de Illinois*, se llegó a concluir que ambos resultados obtenidos son bastante similares.

En dicha investigación los autores concluyen que de los ensayos efectuados a la mezcla estudiada, puede inferirse que para el caso particular de ese estudio una dotación del 5 % de contenido de asfalto residual en la emulsión resulta el adecuado, ya que con este valor se cumple con los parámetros de estabilidad, vacíos totales, densidad y flujo en la mezcla, establecidos por el diseño Marshall Modificado. Habiendo realizado los ensayos correspondientes, esta investigación se llega a concluir que el óptimo de emulsión asfáltica y agua viene siendo alrededor del 5,5 %.

Tabla XV. **Cuadro de comparación con otro estudio realizado**

PARÁMETROS	CRITERIO DE DISEÑO MÉTODO MARSHALL		OTRO RESULTADO	ESTA INVESTIGACIÓN
	MÍNIMO	MÁXIMO		
No. DE GOLPES DE COMPACTACIÓN EN CADA EXTREMO DE LA BRIQUETA PARA MEZCLAS CON EMULSIÓN	50	75	50	75
GRAVEDAD SECA BULK, Gmb	---	---	2,23	2,2
VACIOS DE AIRE EN LA MEZCLA (%)	3	8	7,1	6,35
ESTABILIDAD HÚMEDA (Lb)	750	1200	1850	1530,86
FLUJO, 1/100 IN	8	16	14	12,5
% DE ASFALTO RESIDUAL ÓPTIMO	---	---	5	5,5

Fuente: elaboración propia.

Nota: La variación de golpes utilizados, es por el método de diseño utilizado.

5.2. Interpretación de resultados

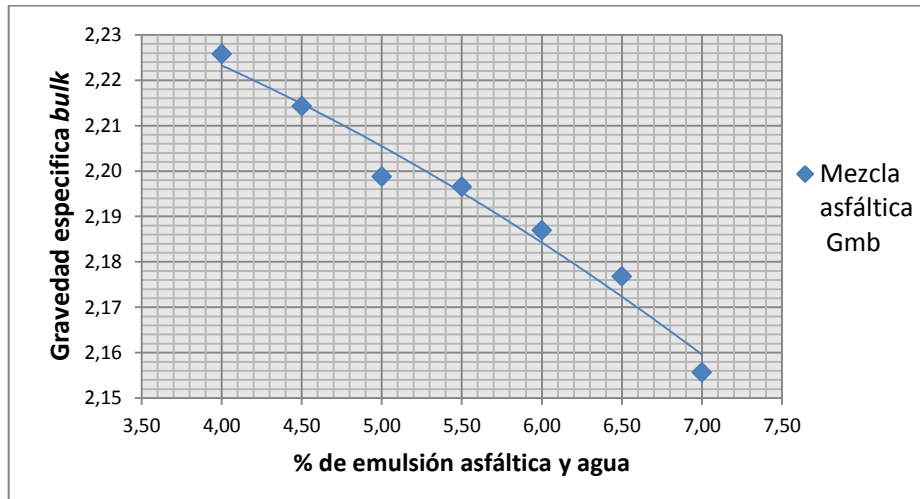
A continuación se presentan las interpretaciones de los ensayos realizados.

Tabla XVI. **Resultado de gravedad específica *bulk***

Porcentaje de emulsión asfáltica y agua	Mezcla asfáltica G_{mb}
4,00	2,23
4,50	2,21
5,00	2,20
5,50	2,20
6,00	2,19
6,50	2,18
7,00	2,16

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Gráfico de gravedad específica *bulk***



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

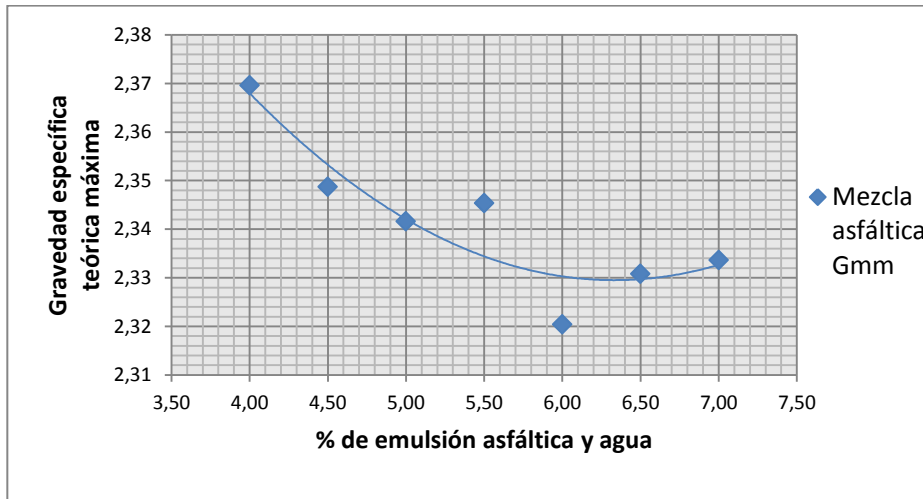
La densidad *Bulk* muestra una tendencia a disminuir, esto es consecuencia del aumento de la humedad en cada intervalo para las diferentes proporciones de diseño. Al ser la densidad de agua menor a la de la emulsión su densidad disminuye.

Tabla XVII. **Resultado de gravedad específica teórica máxima**

Porcentaje de emulsión asfáltica y agua	Mezcla asfáltica G_{mm}
4,00	2,37
4,50	2,35
5,00	2,34
5,50	2,35
6,00	2,32
6,50	2,33
7,00	2,33

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Gráfico de gravedad específica teórica máxima**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

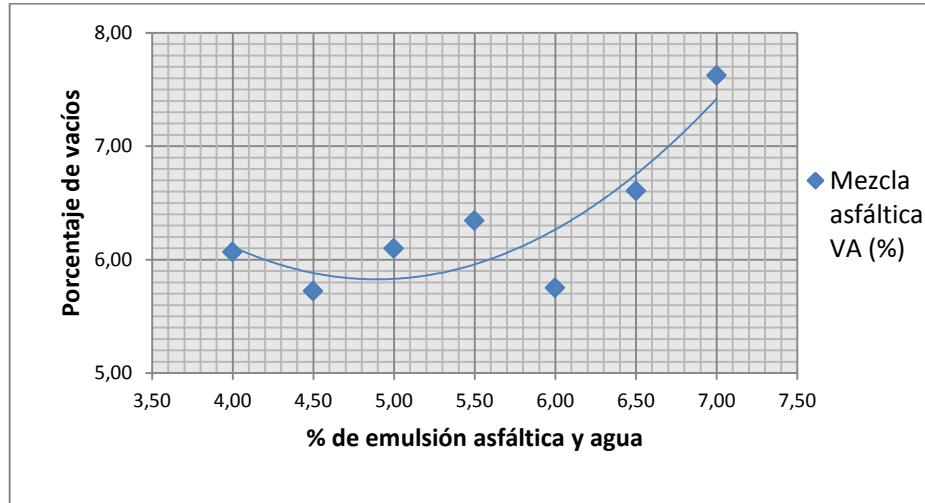
La densidad teórica máxima tiene el comportamiento normal, consecuencia del aumento en la cobertura de la emulsión a las partículas del agregado pétreo, al ser mayor la cantidad de emulsión en el recubrimiento el peso del agregado disminuye.

Tabla XVIII. **Resultado de porcentaje de vacíos**

Porcentaje de emulsión asfáltica y agua	Mezcla asfáltica VA (%)
4,00	6,07
4,50	5,73
5,00	6,10
5,50	6,35
6,00	5,75
6,50	6,61
7,00	7,63

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Gráfico de porcentaje de vacíos**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

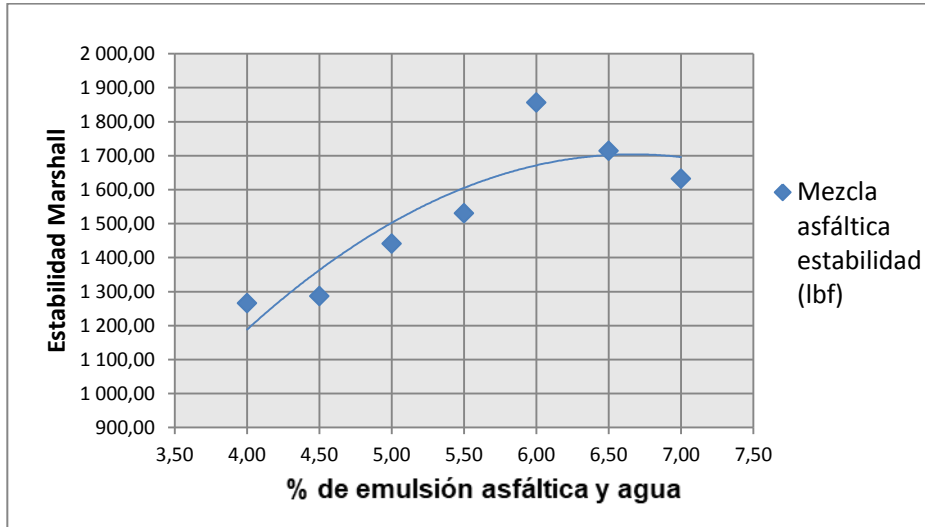
Los vacíos tiene un pequeño cambio debido al porcentaje de emulsión y agua utilizado, todos los datos obtenidos cumplen con las especificaciones para mezclas en frío de la sección 403, de la Dirección General de Caminos.

Tabla XIX. **Resultado de estabilidad Marshall**

Porcentaje de emulsión asfáltica y agua	Mezcla asfáltica estabilidad (lbf)
4,00	1 266,46
4,50	1 286,73
5,00	1 441,73
5,50	1 530,86
6,00	1 856,35
6,50	1 714,21
7,00	1 632,78

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Gráfico de estabilidad Marshall**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

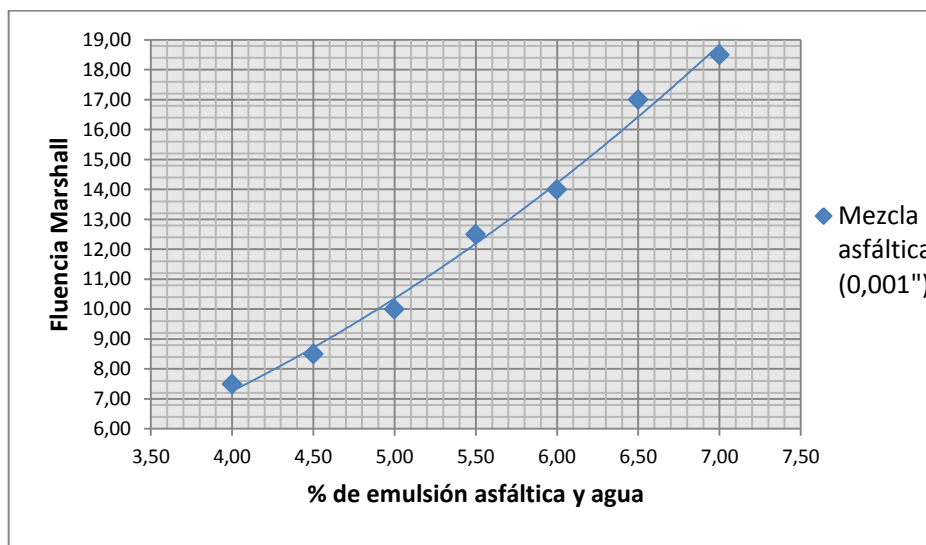
Debido a que los vacíos mantuvieron un pequeño cambio, estos se ven afectados directamente en la resistencia a la compresión indirecta a la que se someten las pastillas de mezcla fría, por lo que su resistencia superó los requerimientos necesarios.

Tabla XX. **Resultado de flujo Marshall**

Porcentaje de emulsión asfáltica y agua	Mezcla asfáltica (0,001")
4,00	7,50
4,50	8,50
5,00	10,00
5,50	12,50
6,00	14,00
6,50	17,00
7,00	18,50

Fuente: elaboración propia.

Figura 22. Gráfico de flujo Marshall



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

La deformación es la que dejó cambios más significativos en el diseño de la mezcla, y se observa que entre más humedad se añadió, mejor fue el recubrimiento que le dio la emulsión a las partículas y con esto aumentó la deformación, el rango permitido es de 8 a 16 por lo cual cumple en el rango de 4,2 a 6,4 por ciento de humedad cumple la especificación.

Tabla XXI. Resultado de relación estabilidad-fluencia

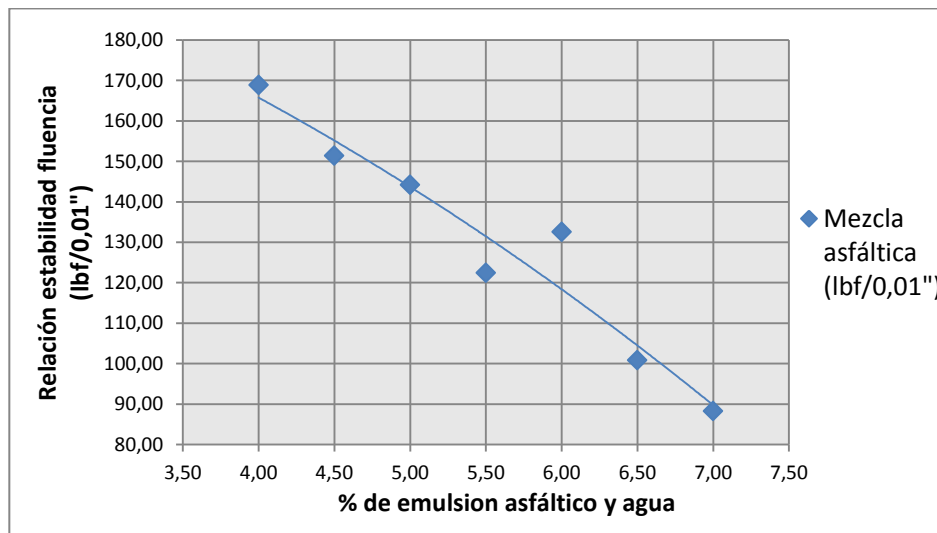
Porcentaje de emulsión asfáltica y agua	Mezcla asfáltica (lbf/0,01")
4,00	168,86
4,50	151,38
5,00	144,17
5,50	122,47
6,00	132,60

Continuación de la tabla XXI.

6,50	100,84
7,00	88,26

Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Gráfico de estabilidad-fluencia**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

La mayoría de porcentajes cumplió con los parámetros necesarios, tomando en cuenta que en las deformaciones pequeñas y en las más altas, la relación se rompe debido a que la relación está fuera de rango.

CONCLUSIONES

1. Debido al diseño granulométrico de los agregados pétreos, los porcentajes de vacíos tuvieron un leve cambio dentro del rango, eso indica que aunque el diseño esté dentro de los parámetros a cumplir, no siempre los ensayos darán resultados óptimos. En una mezcla asfáltica fría, su cumplimiento en el diseño granulométrico es vital para la producción en grandes cantidades, y para que sus propiedades físicas, propiedades mecánicas y cambios volumétricos permanezcan dentro de los parámetros aceptados.
2. Una mezcla fría se trabaja mejor con porcentajes de humedad altos, ya que la humedad permite una mejor adherencia de la emulsión asfáltica con las partículas de agregado pétreo. Aunque la emulsión CSS1-h contiene un porcentaje del 40 % de agua y 60 % de bitumen, es necesario agregar 5,5 % agua, con respecto al peso de agregados pétreos, para que al realizar la mezcla esta sea óptima.
3. El clima afecta directamente el curado de la mezcla o rompimiento de la emulsión, esto debido a que la mezcla debe de perder el porcentaje de humedad necesaria para que tenga un buen funcionamiento con sus propiedades físicas y propiedades mecánicas.
4. La estabilidad Marshall nos especifica que para una mezcla asfáltica en frío tipo C2, esta debe de poseer una carga mínima de 500 lbf, pero al

tener valores cercanos a este límite, se tienen mezclas asfálticas muy inestables a los cambio de temperatura, por lo cual es necesario que este valor se vea sobrepasado por lo menos en un 50 %.

RECOMENDACIONES

1. No es propicio para el rompimiento de la emulsión CSS1-h, la aplicación del material en carreteras, cuando la temperatura sea de 10 °C o menos, clima lluvioso o cuando la humedad del agregado afecte la calidad y uniformidad de la mezcla, para esos casos se deben de utilizar otros tipos de emulsiones que utilicen diferentes composiciones química, para acelerar el curado de la mezcla asfáltica en frío.
2. La emulsión asfáltica CSS1-h debe de mezclarse constantemente para evitar que esta pierda el rompimiento del enlace entre las partículas de agua y bitumen, debido a que si esta se mantiene en un estado de reposo, las partículas de agua se separan y ya no es posible volver a tener una mezcla que se pueda utilizar adecuadamente, por lo que deberá desecharse la emulsión.
3. En una mezcla asfáltica en frío, para su almacenamiento prolongado de 1 mes sin uso, se debe de almacenar en lugares adecuados con una temperatura de 10°C a 60°C en donde esté protegido del sol y la lluvia y se debe de agitar moderadamente para mantener la homogeneidad de la emulsión, previo a su uso.
4. Los materiales pétreos con un alto porcentaje de absorción pueden utilizarse, pero se debe de tener un control del tiempo de curado de la mezcla asfáltica, ya que este exceso de agua absorbida en el material tarda más en evaporarse.

5. Las emulsiones asfálticas modificadas con polímeros (elastómeros o plastómeros) ofrecen una mejor adherencia y resistencia en las mezclas asfálticas en frío, por lo cual son más recomendables para el diseño de mezclas frías para bacheo.

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. AVELLÁN CRUZ, Martha Dina. *Asfaltos modificados con polímeros.* Trabajo de graduación de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2007. 162 p.
6. Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes.* Guatemala: Cámara Guatemalteca de la Construcción, 2001. 724 p.
7. 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.

8. 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.
9. LÓPEZ ALVARADO, Herbert Manuel. *Uso del cemento puzolánico tipo I (pm) como filler para modificar mezclas asfálticas, en caliente por medio del diseño Marshall*. Trabajo de graduación de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2017. 128 p.
10. MENDOZA EXPANEL, Marco Antonio. *Incidencia del origen de los materiales calizos y basálticos en el diseño de mezclas de concreto asfáltico Método Marshall*. Trabajo de graduación de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2009. 188 p.
11. TEREZÓN SEGURA, Sughey Alejandrina. *Programa de mantenimiento basado en la técnica de pavimentos perpetuos para la gestión municipal, con aplicación específica para la ciudad de armenia*. Trabajo de graduación de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador. 2007. 163 p.

APÉNDICES

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



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

Apéndice 2. **Mezcla asfáltica utilizada en el diseño**



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

Apéndice 3. **Probetas compactadas y ensayadas a diferentes porcentajes de emulsión**



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

Apéndice 4. **Espécimen de mezcla asfáltica colocado en recipiente con control termostático para la realización del ensayo de estabilidad y flujo Marshall**



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

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



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

ANEXOS

Anexo 1. **Tabla Humboldt Mfg, Co. Corrección estabilidad Marshall**

LBF	DEFLT		LBF	DEFLT		LBF	DEFLT		LBF	DEFLT		LBF	DEFLT
0	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	253.0		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. **Tabla de resultados, estabilidad Marshall**



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



INFORME NUMERO: 393 S.S.A. ORDEN DE TRABAJO: 38172

INTERESADO: BYRON RICARDO PELAÉZ ASENCIO No. 15691

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION: MEZCLAS ASFÁLTICAS ELABORADAS CON EMULSIÓN TIPO CSS1H

DIRECCION: 24 CALLE 21-83 ZONA 12, SANTA ELISA 2, GUATEMALA

ENSAYO: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 6927-15

FECHA: 21 DE AGOSTO DEL 2018

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA

OBSERVACIONES: MUESTRA PROPORCIONADA POR EL INTERESADO



PORCENTAJE DE EMULSION Y AGUA POR PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
4	1225.91	8
4	1307.01	7
4.5	1266.46	8
4.5	1307.01	9
5	1413.43	11
5	1470.03	9
5.5	1510.58	12
5.5	1551.13	13
6	1836.07	15
6	1876.62	13
6.5	1632.91	18
6.5	1795.52	16
7	1551.13	17
7	1714.42	10

Atentamente,



Ing. Omar Enrique Madrano Méndez
Jefe Sección de Mecánica de Suelos y Asfaltos

Bo. :






Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
Director CII/USAC


FACULTAD DE INGENIERÍA -USAC-
Edificio Emilio Beltranena, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de investigaciones de ingeniería, CII.

Anexo 5. **Tabla de resultados, densidad específica teórica máxima rice.**



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



No. 15694

INFORME NÚMERO: 395 S.S.A. ORDEN DE TRABAJO: 38172

INTERESADO: BYRON RICARDO PELAÉZ ASCENCIO

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION: MEZCLAS ASFÁLTICAS
ELABORADAS CON EMULSIÓN TIPO CSS1H

DIRECCION: 24 CALLE 21-83 ZONA 12, SANTA ELISA 2, GUATEMALA

ENSAYO: DENSIDAD ESPECIFICA TEORICA MAXIMA "RICE" ASTM 2041


FECHA: 21 DE AGOSTO DEL 2018

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA

OBSERVACIONES: MUESTRA PROPORCIONADA POR EL INTERESADO



NO. DE MUESTRA	Gmm
4,00%	2,3700
4,50%	2,3500
5,00%	2,3400
5,50%	2,3500
6,00%	2,3200
6,50%	2,3300
7,00%	2,3300

Atentamente,



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

Vo. Bo. :

Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
Director CII/USAC

FACULTAD DE INGENIERÍA - USAC
Edificio Emilio Beltránena, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de investigaciones de ingeniería, CII.

