



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

**DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA DRENANTE EN CALIENTE PARA PAVIMENTO
FLEXIBLE UTILIZANDO ASFALTO MODIFICADO CON POLÍMEROS SBS**

Denis Caleb Alvarado Ruano

Asesorado por el Ing. José Juan Istupe Ibáñez

Guatemala, noviembre de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA DRENANTE EN CALIENTE PARA PAVIMENTO
FLEXIBLE UTILIZANDO ASFALTO MODIFICADO CON POLÍMEROS SBS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

DENIS CALEB ALVARADO RUANO

ASESORADO POR EL ING. JOSÉ JUAN ISTUPE IBAÑEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

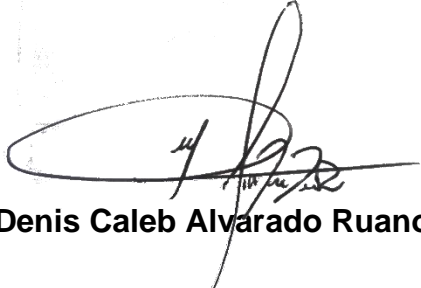
DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
EXAMINADOR	Ing. Alejandro Castañón López
EXAMINADOR	Ing. Jorge Alejandro Arévalo Valdez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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:

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA DRENANTE EN CALIENTE PARA PAVIMENTO FLEXIBLE UTILIZANDO ASFALTO MODIFICADO CON POLÍMEROS SBS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 12 de mayo de 2020.



Denis Caleb Alvarado Ruano



Guatemala, 26 de septiembre de 2022

Ingeniero

Hugo Leonel Montenegro Franco

Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles

Universidad de San Carlos de Guatemala

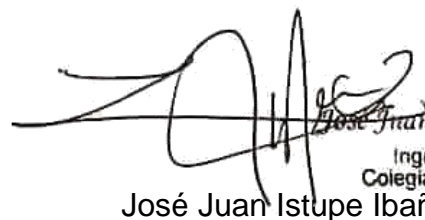
Guatemala

Estimado Ingeniero Montenegro:

Al saludarle cordialmente, me dirijo a usted para informarle que ha sido concluido satisfactoriamente el trabajo de graduación titulado **“DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA DRENANTE EN CALIENTE PARA PAVIMENTO FLEXIBLE UTILIZANDO ASFALTO MODIFICADO CON POLÍMEROS SBS”** elaborado por el estudiante Denis Caleb Alvarado Ruano con registro académico 201602621, tema para el cual fui asignado como asesor.

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

Atentamente,



José Juan Istupe Ibañez
Ingeniero Civil
Colegiado No. 16089

Ingeniero Civil Colegiado No. 16089



Guatemala, 29 de septiembre de 2,022

Ingeniero
Armando Fuentes Roca
Director Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Fuentes, Le informo que he revisado el trabajo de graduación “DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA DRENANTE EN CALIENTE PARA PAVIMENTO FLEXIBLE UTILIZANDO ASFALTO MODIFICADO CON POLÍMEROS SBS”, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil, Denis Caleb Alvarado Ruano, quién contó con la asesoría del Ing. José Juan Istupe Ibáñez.

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 Hugo Leonel Montenegro Franco
Jefe de área de materiales y construcciones civiles.



LNG.DIRECTOR.245.EIC.2022

El Director de la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de Área y la aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA DRENANTE EN CALIENTE PARA PAVIMENTO FLEXIBLE UTILIZANDO ASFALTO MODIFICADO CON POLÍMEROS SBS**, presentado por: **Denis Caleb Alvarado Ruano**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Ing. Armando Fuentes Roca
Director
Escuela de Ingeniería Civil



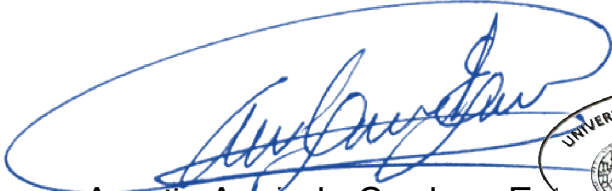
Guatemala, noviembre de 2022




LNG.DECANATO.OI.805.2022

La Decana 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: **DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA DRENANTE EN CALIENTE PARA PAVIMENTO FLEXIBLE UTILIZANDO ASFALTO MODIFICADO CON POLÍMEROS SBS**, presentado por: **Denis Caleb Alvarado Ruano**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, noviembre de 2022

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Quien hizo todas cosas y me permitió culminar esta meta.
Mis padres	Lcda. Karin Ruano y Lic. Neri Alvarado por su amor y apoyo incondicional desde siempre. Los quiero.
Mis hermanos	Keren, Pablo y Obed, por su cariño.
Mis tíos y primos	Por sus valiosos consejos y apoyo brindado.
Mis sobrinos	Porque me motivan a ser un ejemplo.
Mis amigos	Jorge Aldana, Josué Navarro y Noé Ren por todos esos momentos vividos durante la carrera.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por permitirme el acceso a la educación superior.
Facultad de Ingeniería	Por todas las lecciones aprendidas y haberme permitido formarme como profesional.
Escuela de Ingeniería Civil	Por recibirme como estudiante de tan prestigiosa escuela y haber tenido el honor de impartir clases como auxiliar de cátedra.
Ing. José Istupe	Por su asesoría y apoyo incondicional durante el desarrollo del presente trabajo de graduación.
Mis amigos	A todas esas personas que también forman parte de este logro.
Progreso	Por el apoyo brindado para la finalización del presente trabajo de graduación.
PADEGUA	Por el apoyo brindado para el desarrollo del presente trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN.....	XV
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. Aguas superficiales.....	1
1.1.1. Ciclo hidrológico natural y modificado.....	1
1.1.2. Escorrentía derivada de la impermeabilización de la superficie del suelo y sus consecuencias.....	3
1.1.3. Manejo de la escorrentía urbana.....	4
1.2. Pavimentos.....	5
1.2.1. Pavimentos flexibles.....	6
1.2.2. Pavimentos rígidos.....	7
1.2.3. Comportamiento de los pavimentos.....	9
1.3. Agregados pétreos.....	9
1.3.1. Agregado grueso.....	10
1.3.2. Agregado fino.....	11
1.3.3. Agregado mineral, <i>filler</i>	11
1.4. Asfalto.....	12
1.4.1. Betún asfáltico, AC.....	12
1.4.2. Asfaltos rebajados, <i>cutbacks</i>	14
1.4.3. Emulsión asfáltica.....	15

1.5.	Propiedades físicas del asfalto para pavimentos	17
1.5.1.	Adhesión y cohesión	17
1.5.2.	Durabilidad	17
1.5.3.	Susceptibilidad térmica.....	17
1.5.4.	Endurecimiento y envejecimiento	18
1.6.	Propiedades químicas del asfalto para pavimentos.....	19
1.6.1.	Composición química	19
1.6.2.	Propiedades químicas	19
1.7.	Mezcla asfáltica.....	20
1.8.	Modificación en las mezclas asfálticas	20
1.8.1.	Modificado con polímeros.....	21
1.8.2.	Modificado con caucho.....	23
1.9.	Clasificación de las mezclas asfálticas	24
1.9.1.	Según la temperatura de puesta en obra.....	24
1.9.2.	Según la proporción de vacíos	25
1.9.3.	Según el tamaño nominal máximo del agregado	25
1.9.4.	Según la estructura del agregado.....	26
1.9.5.	Por la granulometría	26
2.	PAVIMENTOS DE CONCRETO ASFÁLTICO DRENANTE	27
2.1.	Características de una mezcla asfáltica drenante	28
2.1.1.	Permeabilidad	28
2.1.2.	Porcentaje de vacíos	28
2.1.3.	Contenido de bitumen asfáltico.....	29
2.1.4.	Resistencia a la disgregación	29
2.2.	Ventajas y limitaciones del concreto asfáltico drenante.....	29
2.2.1.	Ventajas	30
2.2.2.	Limitaciones	31

2.3.	Elementos que integran un pavimento de concreto asfáltico drenante	32
2.3.1.	Subrasante	32
2.3.2.	Sub-base	33
2.3.3.	Base	34
2.3.4.	Geotextiles	35
2.3.5.	Capa de rodadura	36
2.4.	Patología en pavimentos asfálticos drenantes	37
3.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	39
3.1.	Normas aplicables al diseño de mezclas asfálticas drenantes	39
3.2.	Caracterización de los agregados.....	39
3.3.	Material bituminoso.....	43
3.4.	Diseño de mezcla de pavimentos drenantes	43
3.5.	Ensayos para mezclas asfálticas drenantes	44
3.5.1.	Compactación de probetas tipo Marshall: INV E-748.....	44
3.5.2.	Gravedad específica máxima de mezclas asfálticas para pavimentos: INV E-735-13	44
3.5.3.	Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas: INV E-736-13	47
3.5.4.	Caracterización de las mezclas asfálticas abiertas por medio del ensayo cántabro de pérdida por desgaste: INV E-760-13.....	50
3.5.5.	Prueba de permeabilidad	55

4.	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS	57
4.1.	Asfalto modificado	57
4.2.	Granulometría del diseño de mezcla	57
4.3.	Fabricación de probetas tipo Marshall	58
4.4.	Densidad bulk de la mezcla compactada	59
4.5.	Gravedad específica bulk de la mezcla compactada	60
4.6.	Gravedad específica máxima de la mezcla: INV E-735	60
4.7.	Porcentaje de vacíos con aire en la mezcla: INV E-736	61
4.8.	Ensayo cántabro de pérdida por desgaste a 25 °C	61
4.9.	Ensayo de adhesividad	62
4.10.	Pruebas de infiltración	62
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	65
5.1.	Resumen de resultados	65
5.2.	Análisis de resultados	69
	CONCLUSIONES	71
	RECOMENDACIONES	73
	REFERENCIAS.....	75
	APÉNDICES	79
	ANEXOS	83

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ciclo hidrológico	2
2.	Relación entre cobertura natural y la cubierta impermeable	4
3.	Esquema de un pavimento flexible	7
4.	Esquema de un pavimento rígido	8
5.	Esquema del comportamiento de los pavimentos.....	9
6.	Mezcla drenante colocada sobre una carpeta preexistente	36
7.	Balanza y picnómetro	45
8.	Picnómetro conectado a bomba de vacío y equipo de agitación.....	47
9.	Toma de dato de masa de probeta en aire	49
10.	Equipo de compactación	52
11.	Fracción de agregados en recipiente tarado.....	53
12.	Probetas de mezcla drenante antes y después del ensayo cántabro ..	54
13.	Prueba de permeabilidad.....	56
14.	Curva granulométrica de diseño	58
15.	Contenido de bitumen vs. porcentaje de vacíos en la mezcla.....	66
16.	Contenido de bitumen vs. permeabilidad.....	67
17.	Contenido de bitumen vs. desgaste por ensayo cántabro a 25 °C.....	68
18.	Contenido de bitumen vs. desgaste por ensayo cántabro a 60 °C.....	69

TABLAS

I.	Límites de granulometría para el agregado fino según norma ASTM C 33-01	11
----	-------------------------------------------------------------------------------	----

II.	Especificaciones del cemento asfáltico según aashto.....	14
III.	Composición química del asfalto.	19
IV.	Polímeros típicos utilizados para modificar asfaltos	22
V.	Denominación de los agregados minerales	39
VI.	Niveles de tránsito	40
VII.	Requisitos aplicables a los agregados para mezcla drenante	40
VIII.	Proporción máxima de arena natural en el agregado.....	41
IX.	Proporción y requisitos de llenante mineral	42
X.	Graduación	42
XI.	Granulometría de la mezcla drenante	57
XII.	Valores promedio de altura y diámetro	59
XIII.	Valores de masa seca de las probetas	59
XIV.	Valores de densidad bulk.....	60
XV.	Valores de gravedad específica bulk	60
XVI.	Valores de gravedad específica máxima	60
XVII.	Valores de porcentaje de vacíos en la mezcla	61
XVIII.	Valores de desgaste por ensayo cántabro a 25 °C	61
XIX.	Valores de desgaste por ensayo cántabro a 60 °C	62
XX.	Valores de volumen de drenado	62
XXI.	Permeabilidad de la mezcla	63
XXII.	Resumen de valores de porcentaje de vacíos en la mezcla.....	65
XXIII.	Resumen de valores de permeabilidad.....	66
XXIV.	Resumen de desgaste por ensayo cántabro a 25 °C.....	67
XXV.	Resumen de desgaste por ensayo cántabro a 60 °C.....	68

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
H	Altura
Ø	Diámetro
°C	Grado centígrado
g	Gramo
g/cm³	Gramo sobre centímetro cúbico
kPa	KiloPascal
M	Masa
m	Metro
ml	Mililitro
mm	Milímetro
mm²	Milímetro cuadrado
mm³	Milímetro cúbico
%	Porcentaje
s	Segundo

GLOSARIO

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials, Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes.</i>
AGC	<i>American General Contractor, Contratista General Americano.</i>
ARTBA	<i>American Road and Transportation Builders Association, Asociación Americana de Constructores de Carreteras y Transportes.</i>
ASTM	<i>American Society of Testing and Materials, Sociedad Americana de Pruebas en Materiales.</i>
Aglomerante	Sustancia o material que puede unir partes de uno o varios materiales.
Emulsión	Es una dispersión más o menos estabilizada de un líquido en otro no miscibles entre sí.
Escorrentía	Agua de lluvia que escurre sobre la superficie terrestre.
Impermeable	Material que no permite el paso de los líquidos.

Infiltración

Proceso en el que el agua entra en el suelo.

Polímero

Compuesto orgánico formado por hidrocarburos que tiene propiedades elásticas.

RESUMEN

En la actualidad, los efectos del cambio climático han producido un aumento en la intensidad y duración de los eventos de precipitación; el proceso constante de urbanización y el uso de materiales impermeables ha producido una reducción en las áreas de infiltración natural generando problemas en el transporte y manejo de aguas de escorrentía.

La acumulación de agua en la superficie ha resultado en inundaciones por los grandes caudales generados por las áreas impermeables en las zonas urbanas. Esto ha generado la búsqueda de alternativas para el manejo de estas aguas superficiales.

Los pavimentos de concreto asfáltico drenante se han convertido en una alternativa como sistema urbano de drenaje sostenible ante los eventos de lluvia torrencial, aportando en el control de escorrentía debido a su superficie porosa y beneficiando en la reducción de los parámetros de diseño de drenajes.

En el presente trabajo de graduación se elaboró un diseño de mezcla asfáltica drenante en caliente utilizando asfalto modificado tomando como referencias las normas del INVIAS de Colombia.

Para el desarrollo del diseño de mezcla, se elaboraron especímenes de ensayo con distintos contenidos del ligante y se evaluaron las propiedades físico-mecánicas de estos en condiciones de laboratorio. Con los resultados obtenidos se determinó el contenido óptimo de bitumen para una granulometría específica, obteniendo así el diseño de la mezcla asfáltica drenante.

OBJETIVOS

General

Diseñar una mezcla asfáltica para pavimentos de concreto asfáltico drenante en caliente utilizando asfalto modificado, para mejorar la evacuación del agua hacia los elementos de drenaje de las carreteras.

Específicos

1. Evaluar la resistencia al desgaste de la mezcla asfáltica drenante a nivel de laboratorio por medio del ensayo Cántabro.
2. Determinar el porcentaje de vacíos con aire de la mezcla compactada de acuerdo con las características volumétricas de las mezclas drenantes.
3. Determinar el contenido óptimo de material bituminoso en la mezcla asfáltica drenante con base en los procedimientos descritos por las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras.

INTRODUCCIÓN

Las vías de comunicación son parte fundamental del desarrollo de cualquier país. Con el creciente proceso de urbanización, el área de infiltración natural del suelo se ha disminuido de forma considerable debido al uso de materiales impermeabilizantes como el concreto hidráulico y mezclas asfálticas convencionales, por lo que cada vez resulta más complicado crear alternativas para el transporte y manejo de las aguas de escorrentías.

Esta acumulación de agua en la superficie puede resultar en una inundación debido a los grandes caudales y bajos tiempos de concentración generados y representan un riesgo para los conductores de transporte liviano y pesado debido a los distintos fenómenos que se generan en la superficie mojada del pavimento. Debido a estos problemas cada vez se buscan más alternativas para el manejo de las aguas que corren en la superficie.

Las mezclas asfálticas drenantes son mezclas cuyo porcentaje de vacíos es mucho mayor a las mezclas asfálticas convencionales, lo que le permite almacenar una parte de la precipitación en su estructura y que otra parte se filtre y sea evacuada hacia los elementos de drenaje de las carreteras, lo que evita que permanezca en la superficie de la rodadura, incluso en eventos de precipitación intensa y prolongada.

Con esto se busca dar solución a los problemas que se generan en la superficie del asfalto durante los eventos de precipitación, aportando en el aumento de tiempos de concentración de lluvia y reduciendo el exceso del caudal desfogado por los drenajes.

1. GENERALIDADES

1.1. Aguas superficiales

Las aguas superficiales son aquellas que se distribuyen a lo largo de la superficie terrestre que se originan de la precipitación y se unen en forma de escorrentía. Estas aguas al encontrar un lugar de reposo se convierten en lagos o lagunas o bien al mantenerse en movimiento se las considera como ríos o arroyos según su magnitud.

Guatemala cuenta con una gran cantidad de agua superficial, suficiente para cubrir cualquier demanda; cuenta con dieciocho ríos principales que se originan en las partes altas de montañas y volcanes y se divide en tres vertientes que son: Pacífico, Atlántico y Golfo de México.

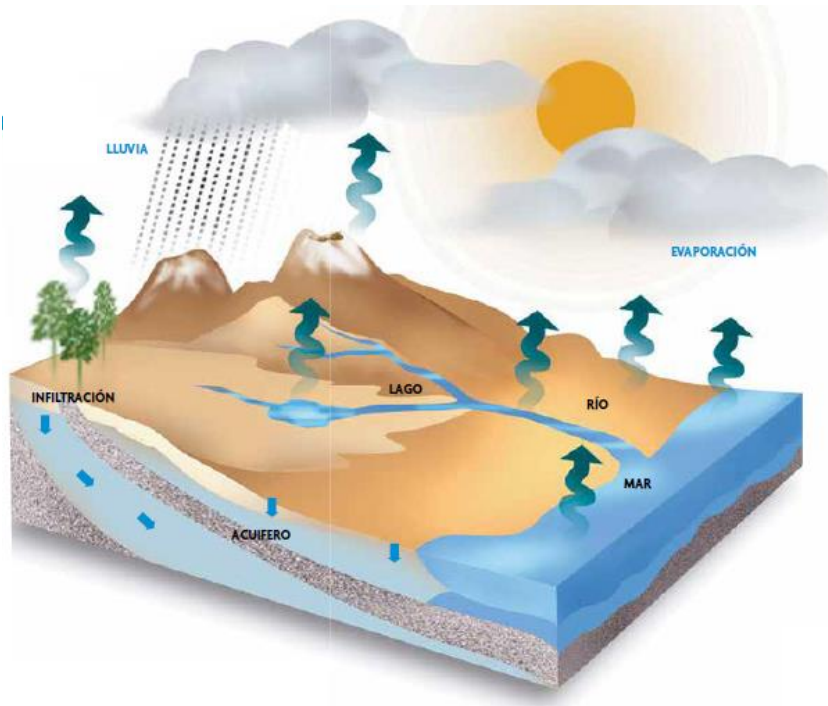
1.1.1. Ciclo hidrológico natural y modificado

El ciclo hidrológico es el recorrido que realiza el agua todo el tiempo, pasando por sus diferentes estados. La lluvia, al caer sobre la tierra, proporciona el agua a los nacimientos y ríos, quienes al final de su recorrido alimentan a los lagos y mares¹.

Debido al calor todos los cuerpos receptores de agua superficial se evaporan en pequeñas partículas de agua suspendidas en el ambiente, que, al juntarse, forman cúmulos y cuando suceden cambios bruscos de temperatura, se condensan convirtiéndose nuevamente en precipitación, completando el ciclo.

¹ Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación. *Manual de educación ambiental sobre el recurso hídrico en Guatemala*. p. 11.

Figura 1. **Ciclo hidrológico**



Fuente: Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación. *Manual de educación ambiental sobre el recurso hídrico en Guatemala*. p. 11.

El ciclo hidrológico se modifica cuando existen alteraciones en la superficie, un ejemplo de esto es la deforestación de grandes extensiones de bosques, lo que deriva en la disminución de infiltración y recarga de las aguas freáticas y da lugar a escurrimiento pluvial. Cuando al agua escurre y no encuentra vegetación que la retenga, llega hacia los cuerpos de agua de manera más rápida provocando inundaciones y contaminación de estos cuerpos debido al arrastre de sedimentos y materia inorgánica. Mismo caso puede atribuírsele a las grandes extensiones de urbanización, lo que altera también la superficie del suelo, reduciendo sus capacidades de retención e infiltración.

1.1.2. Escorrentía derivada de la impermeabilización de la superficie del suelo y sus consecuencias

La impermeabilización de la superficie del suelo se considera una modificación al ciclo hidrológico. En las zonas urbanas la precipitación no llega directamente al suelo, esta es retenida por los tejados, cubiertas y cualquier otra superficie impermeabilizante la cual redirige estas aguas a través de un complejo sistema de captación, lo que implica una tasa muy baja de infiltración y recarga de aguas freáticas.

Al caer la precipitación sobre cualquier superficie impermeable esta se junta y escurre rápidamente hacia elementos de drenaje; los drenajes y alcantarillas son diseñados para recibir y transportar toda el agua de escorrentía superficial hacia cuerpos receptores. “Durante años la práctica habitual de drenaje urbano ha sido conducir el agua rápidamente fuera de la ciudad... fruto de estas prácticas, los ríos han perdido su riqueza natural y su capacidad de respuesta ante las crecidas”²; Al aumentar el área de desarrollo urbano, las alcantarillas son incapaces de manejar la cantidad de escorrentía adicional proveniente de estas nuevas áreas.

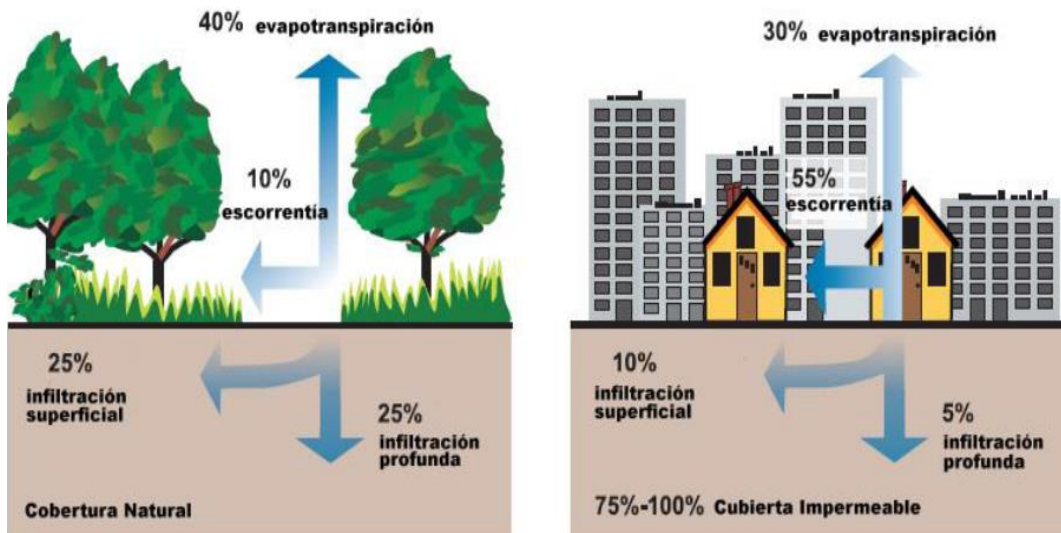
“Las ciudades están creciendo y evolucionando permanentemente, por lo general más rápido que sus sistemas de drenaje pluvial”³, considerando la creciente urbanización, diseños viejos y el cambio climático, aunado a suelos poco permeables, esto provoca tiempos de concentración bajos en los alcantarillados. Como consecuencia, las inundaciones se vuelven más regulares y el caudal de la escorrentía aumenta considerablemente, razón por la que las

² CASTRO FRESNO, Daniel, et al. *Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)*. p.255.

³ QUIROZ, Diana y TRUJILLO, Alejandra. *Pavimentos porosos utilizados como sistemas alternativos al drenaje urbano*. p.10.

superficies permeables y la capacidad de campo disminuyen; debido a estos factores se pueden generar problemas de inundación cuando se presentan frecuentemente tormentas con un periodo de retorno bajo.

Figura 2. **Relación entre cobertura natural y la cubierta impermeable**



Fuente: GONZALEZ, Carmen y LOZADA, William. *Manejo y control de las aguas de escorrentía para mantener la calidad del agua.* p 14.

1.1.3. Manejo de la escorrentía urbana

Los efectos del cambio climático suponen retos en cuanto al manejo de los recursos hídricos en las zonas urbanas. Cada vez se desarrollan más alternativas de manejo sostenible al drenaje urbano, las cuales varían de acuerdo con las condiciones de cada ciudad.

Un sistema de drenaje pluvial en general debe proteger las vidas humanas, la infraestructura urbana, el entorno natural y mantener la movilidad vehicular y peatonal... el enfoque de manejo integral de drenaje urbano implica no solo el manejo de la cantidad de agua y calidad, sino también la capacidad de adaptabilidad frente al cambio climático del sistema de drenaje que se proyecte para la ciudad.⁴

El sistema de drenaje pluvial comúnmente inicia en las calles, estas transportan la escorrentía superficial cuando se carece de un sistema de alcantarillado. Las calles funcionan como canales debido a su condición impermeabilizada, generando tiempos de concentración cortos y grandes caudales en pendientes pronunciadas lo que supone un gran riesgo de inundación en zonas bajas.

Cuando se cuenta con sistema de alcantarillado, este transporta la escorrentía, sin embargo, con el aumento de superficie urbanizada y tormentas más intensas debido al cambio climático, los diámetros existentes resultan insuficientes para transportar la nueva demanda de agua superficial.

1.2. Pavimentos

Un pavimento es una estructura compuesta de muchas capas, cuya función es proporcionar una superficie que sea capaz de recibir las cargas directas del tránsito y transmitir las eficientemente a través de las capas que lo constituyen hasta una subrasante debidamente preparada.

“Los pavimentos tienen por finalidad “proporcionar una superficie de rodamiento que permita el tráfico seguro y confortable de vehículos, a velocidades operacionales deseadas y bajo cualquier condición climática”⁵.

⁴ ÁVILA, Humberto. *Perspectiva del manejo de drenaje pluvial frente al cambio climático – caso de estudio: Ciudad de Barranquilla, Colombia*. p. 54.

⁵ Universidad Mayor de San Simón. *Libro de pavimentos*. p. 2.

Un pavimento debe ser capaz de brindar adherencia a los vehículos, incluso en condiciones climáticas adversas, y poder resistir el efecto abrasivo que estos generan, evitando fallas y agrietamientos. Estos “son soluciones para la configuración de caminos, siendo concebidos, diseñados y construidos pensando en mejorar y mantener condiciones óptimas para el tránsito de personas, de bienes y servicios, a lo largo de su vida útil”⁶.

El diseño debe procurar que el pavimento sea funcional con el menor costo posible, por lo tanto, existen diversos tipos de pavimentos dependiendo del tipo y volumen de vehículos que transitarán. Las capas que constituyen un pavimento son de material de granulometría seleccionada cuyo espesor también varía en función del tipo de tráfico que debe resistir. Existen dos tipos de pavimentos: flexible y rígidos.

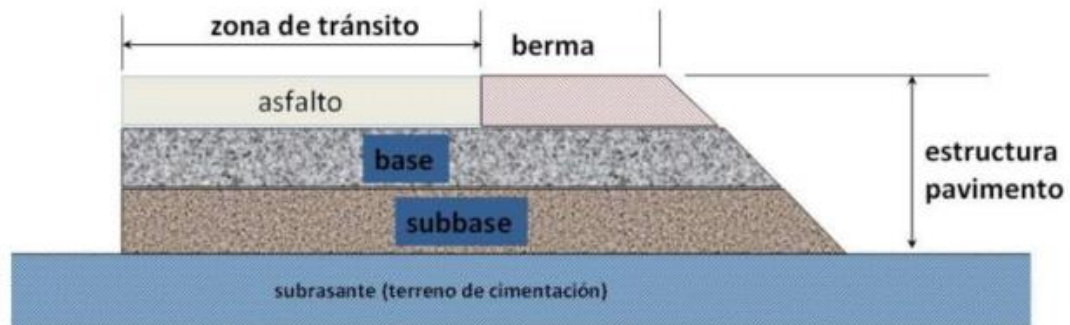
1.2.1. Pavimentos flexibles

Los pavimentos flexibles son aquellos que están conformados por una superficie de rodadura hecha de concreto asfáltico como medio primario para la transferencia de cargas, sobre una base granular.

La estructura de este pavimento se compone de carpeta de rodadura, base y sub-base. La capa de rodadura está compuesta por una mezcla de un cementante bituminoso, grava, arena y finos, que compactado, le permiten tener un comportamiento plástico. Dado que el asfalto no absorbe la totalidad de las cargas, requiere de un mayor número de capas entre la superficie y la subrasante.

⁶ BECERRA, Mario. *Tópicos de Pavimentos de Concreto*. p. 4-5.

Figura 3. **Esquema de un pavimento flexible**



Fuente: BECERRA, Mario. *Tópicos de Pavimentos de Concreto*. p. 6.

Este tipo de pavimento se encuentra tanto en zonas de tránsito denso como en áreas suburbanas, en vías principales como en secundarias, hasta parqueos y ciclovías; es el de uso más común ya que su construcción inicial resulta más económica que otros tipos y su periodo de vida oscila desde 8 a 20 años. Sin embargo, este tipo de pavimento requiere de mantenimiento constante para que pueda cumplir su periodo de vida.

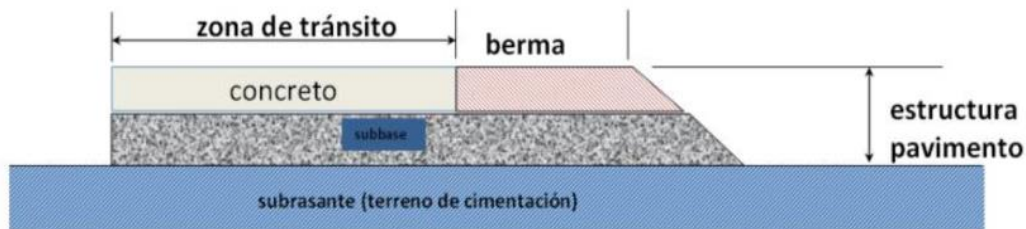
Los pavimentos flexibles tienden a fallar por fatiga; produciéndose fisuras por la repetida acción de las cargas del tráfico en un proceso de compresión y tensión en las fibras extremas de la capa de asfalto.

1.2.2. Pavimentos rígidos

Los pavimentos rígidos son aquellos que están conformados por una superficie de rodadura hecha de concreto de cemento hidráulico tipo portland como medio primario para la transferencia de cargas, sobre una base granular.

La superficie de este pavimento se compone de una estructura de losas de concreto que absorbe la mayor parte de las cargas y las distribuye de forma más eficiente debido a su alta resistencia a la flexión; en algunos casos puede presentar una armadura de acero para aumentar su resistencia. Debido a su gran capacidad y mayor eficiencia necesita una menor cantidad de capas entre la superficie de rodadura y la subrasante. Debajo que la capa de rodadura se coloca una sub-base de material granular seleccionado que puede ser de materiales con menor capacidad de soporte que la base en los pavimentos flexibles.

Figura 4. **Esquema de un pavimento rígido**



Fuente: BECERRA, Mario. *Tópicos de Pavimentos de Concreto*. p. 6.

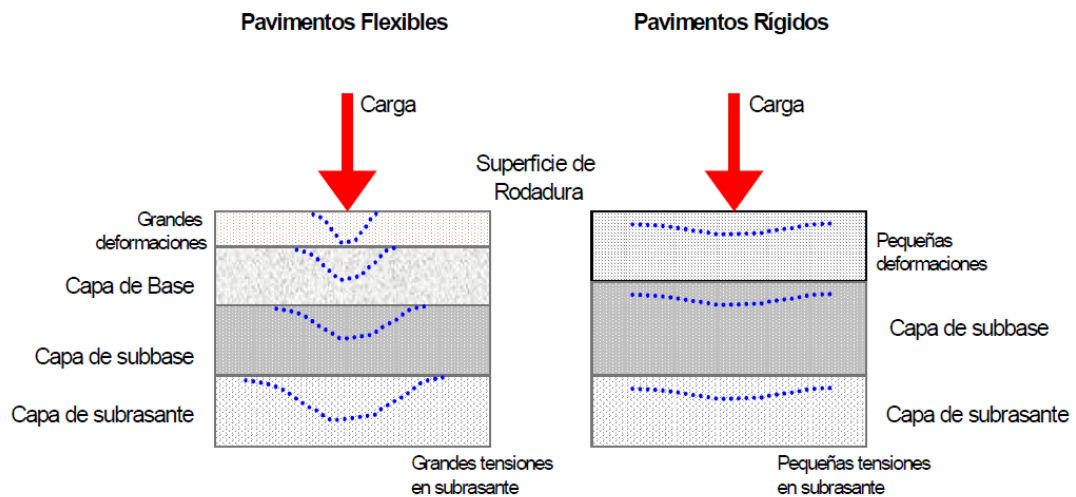
Los pavimentos rígidos se usan en carreteras de primer orden, cuyo diseño deben soportar una alta demanda de cargas. Su construcción inicial es mucho más costosa que otros, pero requiere menos mantenimiento periódico, comúnmente solo se realiza en las juntas. Su periodo de vida oscila desde 20 a 40 años.

Los pavimentos rígidos tienden a fallar por deflexiones excesivas, sobre todo en bordes y esquinas; produciéndose fisuración por fatiga debido a la repetida acción de las cargas del tráfico.

1.2.3. Comportamiento de los pavimentos

El comportamiento de los pavimentos flexibles y rígido bajo la acción de cargas es muy diferente. Los pavimentos de concreto hidráulico debido a la rigidez de su superficie de rodada, produce una buena distribución de las cargas, transmitiendo así tensiones muy bajas a la subrasante, por otro lado, los pavimentos de concreto asfáltico sufren mayores deformaciones por su baja rigidez, resultando en una mayor tensión en las capas inferiores.

Figura 5. Esquema del comportamiento de los pavimentos



Fuente: CORONADO, Jorge. Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos. cap. 5. p. 1.

1.3. Agregados pétreos

Los agregados pétreos hacen referencia a un conjunto de partículas granulares con tamaño y forma estable de origen mineral. Estos se obtienen de cauces de ríos, pozos secos o canteras y se utilizan en estado natural o se alteran mediante un proceso de trituración o pulverización.

Los agregados, también conocidos como material granular selecto, rocas o agregado mineral tienen diversos criterios de clasificación. Según su origen se clasifican en naturales o artificiales; por su tamaño en finos y gruesos; por la densidad en ligeros, normales y pesados y por su forma como canto rodado, triturado o mixto.

El tamaño de los agregados se clasifica de acuerdo con una serie de tamices normalizados por la ASTM que también permite determinar la calidad de su granulometría.

1.3.1. Agregado grueso

Es el material granular pétreo que se obtiene de la desintegración natural o por trituración de grandes rocas. Comúnmente se le conoce como grava y se clasifica en diversos tamaños. El tamaño máximo del agregado grueso está en función de las necesidades específicas del diseño de un proyecto y el tamaño mínimo es todo el material que retiene el tamiz #4, la malla de abertura de $\frac{1}{4}$ ".

Comercialmente se clasifica de la siguiente manera:

- Gravilla: es la grava libre de impurezas con un diámetro nominal entre $\frac{1}{4}$ " y $\frac{1}{2}$ ".
- Grava de río: es la que se extrae de cualquier río o arroyo y su forma es redondeada, generalmente está libre de arcillas y su tamaño es mayor a $\frac{1}{4}$ ".
- Grava de banco: se encuentra en depósitos naturales mezclado con arenas y arcillas y tiene forma redondeada.
- Grava triturada: es el resultado de la trituración mecánica de distintos tipos de rocas, se obtienen en plantas trituradoras.

1.3.2. Agregado fino

Es el material granular pétreo obtenido de un proceso de desintegración natural o trituración del agregado grueso. Comúnmente se le conoce como arena y existen diversos tamaños de partículas finas, van desde el material que pasa el tamiz #4 hasta el material que retiene el tamiz #200.

Tabla I. **Límites de granulometría para el agregado fino según Norma ASTM C 33-01**

TAMIZ	PORCENTAJE QUE PASA
3/8" (9.5mm)	100%
No. 4 (4.75mm)	95% a 100%
No. 8 (2.36mm)	80% a 100%
No. 16 (1.18mm)	50% a 85%
No. 30 (600 µm)	25% a 50%
No. 50 (300 µm)	10% a 30%
No. 100 (150 µm)	2% a 10%

Fuente: LÓPEZ CÓRDOBA, Sergio Iván. *Determinación de las características: físicas, mecánicas, químicas y petrográficas de agregados, extraídos del río Samalá, del Municipio de San Sebastián, Retalhuleu y del río San Miguel Panán, del Municipio de San Miguel Panán, Suchitepéquez, para uso en la industria del concreto.* p. 1.

1.3.3. Agregado mineral, filler

El relleno mineral es un material fino cuyas partículas son más pequeñas que la arena, el porcentaje que pasa el tamiz #200 es mayor al 80 % y pueden ser producto de pulverización natural o mecánica. Lo más comunes son:

- Limo: es un material poroso depositado naturalmente por el viento, su tamaño es mucho menor a la arena, pero mayor que las arcillas.

- Polvo granular: se obtiene de la pulverización de roca caliza, cemento tipo Portland o de otros polvos naturales o artificiales.

1.4. Asfalto

El asfalto es una sustancia “compuesta esencialmente de hidrocarburos solubles en sulfuro de carbono en su mayor parte y procedentes de yacimientos naturales u obtenidos como residuo del tratamiento de determinados crudos de petróleos por destilación o extracción”⁷ cuyo estado puede ser líquido, semisólido o sólido.

Las propiedades físicas y químicas del asfalto permiten su aplicación en diversas actividades debido a que es un agente aglomerante muy fuerte y durable, sobre todo cuando se combina con áridos en la elaboración de pavimentos. Las características más apreciadas son la gran capacidad de cohesión, resistencia a la disgregación e impermeabilización. En la construcción y mantenimiento de carreteras se utilizan diversos tipos de asfaltos derivados, entre ellos se encuentra el betún asfáltico, asfaltos fluidificados y emulsiones asfálticas.

1.4.1. Betún asfáltico, AC

Los betunes asfálticos “son productos bituminosos sólidos o viscosos, naturales o preparados a partir de los hidrocarburos naturales por destilación, oxidación o *cracking*, que contienen un pequeño porcentaje de productos volátiles, poseen características aglomerantes y son esencialmente solubles en

⁷ BARRIOS, Walter. *Guía teórica y práctica del curso de pavimentos y mantenimiento de carreteras*. p. 22.

sulfuro de carbono”⁸. Estos ligantes se obtienen del residuo de las refinerías de petróleo o como producto final en refinerías de crudo asfáltico.

El betún asfáltico, también conocido como bitumen o cemento asfáltico AC, se caracterizan por tres sistemas:

- Según la consistencia evaluada en el ensayo de penetración, ASTM D-946 se utiliza los siguientes grados de penetración:
 - 40-50
 - 60-70
 - 85-100
 - 120-150
 - 200-300

Los grados de penetración representan la distancia que penetra una aguja en décimas de milímetro durante un tiempo determinado, un mayor grado de penetración indica un asfalto más blando.

- Según la viscosidad absoluta de una mezcla a 60 °C, ASTM D-3381, la unidad de medida es el poise y se clasifican en:
 - AC-5, 500±100: se utiliza en mezclas asfálticas en caliente, emulsiones para riego de impregnación y riego de liga.
 - AC-10, 1000±200: se utiliza en morteros de mezcla en frío y emulsiones asfálticas.

⁸ YEPES, Víctor. *Los ligantes hidrocarbonados*. Obtenido en: <https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/betun-asfaltico/>. Consulta: 9 de junio de 2020.

- AC-20, 2000±400: se utiliza en mezclas asfálticas en caliente y pavimentos con mezclas en frío.
- AC-30, 2000±400: se utiliza en mezclas asfálticas en caliente, emulsiones asfálticas y pavimentos con mezclas en frío.
- Según el comportamiento, ASTM D-6373, permite conocer las temperaturas máximas y mínimas del pavimento en función de las condiciones atmosféricas y geográficas para determinar el comportamiento del envejecimiento del asfalto.

Tabla II. **Especificaciones del cemento asfáltico según AASHTO**

TIPO Y GRADO DEL CEMENTO ASFALTICO	ESPECIFICACION
Graduación por viscosidad: <ul style="list-style-type: none"> • AC-10 • AC-20 • AC-40 	AASHTO M 226
Graduación por penetración: <ul style="list-style-type: none"> • 40-50 • 60-70 • 85-100 • 120-150 	AASHTO M 20
Graduación PG: <ul style="list-style-type: none"> • 64-22 • 70-22 • 76-22 • 82-22 	AASHTO MP 1

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes*. Edición 2001. Sección 401-7.

1.4.2. **Asfaltos rebajados, *cutbacks***

Los asfaltos rebajados son producto de la incorporación de disolventes hidrocarbonados al betún convencional procedentes del mismo crudo asfáltico para evitar la precipitación de asfaltenos. Estos facilitan la aplicación de betunes

asfálticos cuando la temperatura o el tipo de tratamiento requieren una menor viscosidad que la que se obtiene al calentar el ligante asfáltico; su consistencia es casi líquida a temperatura ambiente y son inflamables. También se les conoce como asfaltos fluidificados o *cutbacks*.

Luego de aplicar los asfaltos rebajados el disolvente se evapora por la acción de agentes atmosféricos dejando únicamente el betún asfáltico, lo que se conoce como proceso de curado. Existen distintos tipos de asfaltos rebajados que se clasifican por el tiempo de curado y son:

- De curado rápido, RC: está compuesto de betún asfáltico con adición de nafta o gasolina como disolventes, es muy volátil.
- De curado medio, MC: está compuesto de betún asfáltico con adición de querosene como disolventes, es menor volátil que el de curado rápido.
- De curado lento, SC: está compuesto de betún asfáltico y aceites derivados de la hulla, también se le conoce como betún fluxado y es poco volátil.

1.4.3. Emulsión asfáltica

Las emulsiones bituminosas son ligantes hidrocarbonados obtenidos de la adición de agua al betún asfáltico. Se emplean para facilitar la puesta en obra del betún disminuyendo su viscosidad y son ideales para aplicarlas en tiempo lluvioso, con áridos húmedos e incluso con temperaturas bajas sin los inconvenientes que presentan habitualmente los betunes fluidificados.⁹

⁹ YEPES, Víctor. *Los ligantes hidrocarbonados*. Obtenido en: <https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/betun-asfaltico/>. Consulta: 10 de junio de 2020.

Una emulsión “es un sistema compuesto de dos líquidos inmiscibles de lo que uno se dispersa en el otro en forma de gotas diminutas. Se llama al primero fase dispersa y al segundo, fase continua”¹⁰.

Las dos fases presentes son bitumen y agua; estos son inmiscibles entre sí por lo cual se adiciona un agente emulsificante, el cual modifica sus propiedades colocando una capa interfacial de los componentes, generando así las llamadas micelas. Cada sistema puede resultar en dos tipos de emulsión, agua en aceite, W/O y aceite en agua, O/W; siendo estas una con mayor parte agua y otra con mayor parte de bitumen, respectivamente.

En la emulsión asfáltica el agua representa un medio de transporte para el bitumen por lo que se presenta entre 55 % y 70 % de una emulsión. Para que el agua se disperse correctamente se le añaden sustancias que le dan carácter polar y se clasifican en emulsiones catiónicas y aniónicas según el tipo de agente emulsificante utilizado. Las emulsiones aniónicas se adhieren de mejor manera con los áridos calizos, que son los más utilizados; los áridos silíceos se adhieren mejor con las emulsiones catiónicas.

Existen ciertos casos donde es necesario mejorar la adherencia entre la emulsión y los áridos, para esto se utiliza un polarizante. Al igual que los asfaltos rebajados la adición del agua debe desprenderse del betún asfáltico, lo que se denomina proceso de rotura y existen emulsiones de rotura rápida, media y lenta, según la velocidad del rompimiento.

¹⁰ BARRIOS, Walter. *Guía teórica y práctica del curso de pavimentos y mantenimiento de carreteras*. p. 24.

1.5. Propiedades físicas del asfalto para pavimentos

Los asfaltos contienen propiedades físico-mecánicas según su reología, que puede determinar a través de distintas pruebas estandarizadas, las siguientes propiedades físicas son las de mayor importancia en el diseño y mantenimiento de pavimentos:

1.5.1. Adhesión y cohesión

La adhesión es la capacidad que tiene el asfalto para adherirse al resto de componentes que integran una mezcla asfáltica de pavimentación y cohesión es la capacidad de mantener firmes los agregados luego de su colocación. El bitumen de ser capaz de rodear los agregados dando cohesión a la mezcla incluso en presencia de agua, factor que produce una separación entre el ligante y los áridos.

1.5.2. Durabilidad

La durabilidad se refiere al tiempo que un asfalto puede retener sus características mecánicas cuando es puesto a prueba en condiciones de uso normal. Esta propiedad se dificulta medir solo en términos del asfalto por lo que se mide con respecto al comportamiento de un pavimento, el cual es influenciado por el diseño de mezcla, la calidad de los agregados, el proceso constructivo y otras variables más.

1.5.3. Susceptibilidad térmica

La susceptibilidad térmica se debe a que el asfalto es un material termoplástico, por lo tanto, su viscosidad varía con la temperatura. La viscosidad

es la propiedad de un fluido de oponerse al flujo cuando se le aplica una fuerza. La viscosidad está directamente relacionada con su resistencia a fluir, es decir, a mayor viscosidad, mayor oposición al flujo y está inversamente relacionado con la temperatura, a mayor temperatura, menor oposición a fluir.

La importancia de la susceptibilidad térmica es encontrar la temperatura idónea para que el bitumen pueda ser capaz de fluir a temperaturas altas para que pueda rodear todas las partículas durante la elaboración de la mezcla y que se distribuyan adecuadamente durante la colocación. Al enfriarse a temperatura ambiente debe ser lo suficientemente viscoso para mantener unidos los áridos.

1.5.4. Endurecimiento y envejecimiento

El envejecimiento es la pérdida de las propiedades físico-mecánicas de la mezcla según el diseño propuesto. Los asfaltos se endurecen desde que salen de la planta y comienzan a enfriarse, durante y posterior a la colocación; esto es causado por la combinación del asfalto con oxígeno y comienza a ocurrir cuando el asfalto se encuentra en el proceso de mezclado, revistiendo los agregados con una fina película a temperaturas elevadas.

El endurecimiento y oxidación ocurren en mayor manera durante el mezclado, cada lote de una planta se debe evaluar para determinar las propiedades mecánicas, ya que no todos los asfaltos se endurecen a la misma velocidad, de modo que la producción se debe ajustar a la temperatura que provoca el menor endurecimiento del asfalto. Se debe mezclar el bitumen y los agregados a la temperatura más baja posible.

1.6. Propiedades químicas del asfalto para pavimentos

1.6.1. Composición química

El asfalto se compone de asfaltenos, resinas y aceites aromáticos y saturados. El asfalto es un sistema disperso cuando se encuentra a una temperatura de trabajo, las micelas son las partículas de la fase dispersa cuyo agregado es el asfalteno. Los asfaltenos se forman cuando se condensan las resinas.

Todos los metales que contiene el crudo se concentran en el asfalteno, que se conforma de: Vanadio, Manganeso, Hierro, Cobalto, Nickel, y en mayor medida Oxígeno, Nitrógeno y Azufre.

Tabla III. Composición química del asfalto.

Elemento	Concentración (%)
Carbono	82- 88%
Hidrogeno	8- 11%
Azufre	0- 6%
Oxigeno	0-1.5%
Nitrógeno	0- 1%

Fuente: GARZÓN, Germán. Conferencia: Introducción a la Química del Asfalto. 2004.

1.6.2. Propiedades químicas

El asfalto es una sustancia termoplástica con características de aglutinación por su constitución de asfaltenos y maltenos, es altamente resistente en su mayor parte a los ácidos, álcalis y sales. Se licúa fácilmente al aplicársele calor,

disolventes volátiles o por emulsificación. El asfalto contiene tres propiedades químicas importantes: la habilidad de fluidificarse en altas temperaturas, el contenido de impurezas o materiales inertes y la seguridad al comportamiento ante distintas cargas eléctricas.

1.7. Mezcla asfáltica

Una mezcla asfáltica o concreto asfáltico es una mezcla de proporciones estrictamente controladas de materiales pétreos, polvo mineral, cemento asfáltico y aditivos, para obtener un producto de alta resistencia y duración, con características de calidad uniformes, que se puede tender y compactar de inmediato en la carretera, en una o varias capas, de ser requerido.¹¹

1.8. Modificación en las mezclas asfálticas

Los asfaltos modificados son mezclas que contienen algún agente externo que mejora el desempeño y las propiedades físicas. “Las propiedades viscoelásticas del cemento asfáltico pueden ser mejoradas mediante la adición de modificadores del asfalto que pueden ser polímeros que incluyen los elastómeros, compuestos metálicos, compuestos azufrados, fibras y silicones”¹², de tal forma que permite ampliar el rango de temperaturas de la clasificación por desempeño y así obtener una gama más amplia de productos para que su aplicación sea eficaz bajo cualquier condición adversa de servicio. El uso de modificadores permite mejorar las siguientes propiedades:

- Susceptibilidad a la temperatura
- Adhesión a los agregados
- Resistencia a la deformación permanente

¹¹ Dirección General de Caminos. *Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes*. Edición 2001. Sección 401-1.

¹² Dirección General de Caminos. *Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes*. Edición 2001. Sección 411-1.

- Resistencia al agrietamiento por fatiga
- Ductilidad
- Elasticidad

1.8.1. Modificado con polímeros

La mezcla asfáltica polimerizada es una mezcla cuyo bitumen contiene polímeros que le da una mayor resistencia al desgaste por uso, también ayuda a corregir las deformaciones asociadas a las altas temperaturas y el agrietamiento por contracciones térmicas brindándole una mayor vida útil en comparación con el bitumen convencional, aumentando el intervalo entre cada mantenimiento, lo que reduce los costos del proyecto.

Los polímeros tienen una estructura de cadena de hidrocarburos más larga en comparación con el asfalto y al mezclarse en proporción de 1 a 2 por ciento incrementa la rigidez o la viscosidad del bitumen a altas temperaturas. El mejoramiento del desempeño a bajas temperaturas es más limitado, las propiedades a bajas temperaturas las determina principalmente el grado del asfalto base. En proporción de 3 a 4 por ciento el polímero forma una estructura de red. Los polímeros utilizados en la fabricación de asfaltos modificados se clasifican en elastómeros y plastómeros.

- Elastómeros: mejoran las propiedades elásticas de la mezcla, los tipos básicos para modificar asfaltos son hules sintéticos de Estireno-Butadieno SB, hule de Estireno-Butadieno SBR y Hule Termoplásticos de Estireno-Butadieno-Estireno SBS.

- **Plastómeros:** mejoran la rigidez de la mezcla, los tipos básicos para modificar asfaltos son polietileno de baja densidad LDPE y Etileno-Vinilo-Acetato EVA.

Tabla IV. **Polímeros típicos utilizados para modificar asfaltos**

Tipo	Presentación	Composición Química
1. Elastómeros:		
• Copolímero de Bloque	Látex	Estireno-Butadieno (SB)
• Copolímeros aleatorios	Látex	Estireno-Butadieno-Hule (SBR)
• Copolímero de Bloque	Granulado o en polvo	Estireno-Butadieno-Estireno (SBS)
• Copolímero de Bloque	Grumos	Estireno-Butadieno (SB)
• Copolímero de Bloque	Granulado o en polvo	Estireno-Butadieno-Estireno (SBS)
• Homopolímero	Látex	Policloropreno
• Copolímeros aleatorios	Látex	Estireno-Butadieno-Hule (SBR)
• Copolímero de Bloque	Pre-mezclado	Estireno-Butadieno (SB)
• Copolímero aleatorio	Látex	Estireno-Butadieno-Hule (SBR)
• Copolímero de Bloque	Granulado o en polvo	Estireno-Butadieno-Estireno (SBS)
2. Plastómeros:		
• Copolímero	Granulado o en polvo	Etileno Vinilo Acetato (EVA)
• Homopolímero	Premezclado con el CA	Polietileno de Baja Densidad (LDPE)
• Copolímero	Granulado o en polvo	Etileno Vinilo Acetato (EVA)
• Copolímero	Granulado o en polvo	Etileno Metilacrilato (EMA)
• Copolímero	Pelotitas (Pellets)	Etileno Vinilo Acetato (EVA)

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes*. Edición 2001. Sección 411-2.

Según las especificaciones desarrolladas por la AASHTO-AGC-ARTBA, los distintos tipos de asfaltos modificados con polímeros se agrupan de la siguiente manera:

- **Tipo I:** cemento asfáltico convencional modificado con copolímeros de bloque de Estireno y semibloques de Butadieno y pueden ser configuraciones tipo SB o SBS.

- Tipo II: cemento asfáltico convencional modificado con látex de hule de estireno butadieno SBR o Neopreno.
- Tipo III: cemento asfáltico convencional modificado con acetato-vinilo-etileno EVA o con polietileno.

1.8.2. Modificado con caucho

La incorporación de caucho supone una tecnología alternativa para mejorar las propiedades del asfalto convencional, permite una mejora en la resistencia a la exposición de agentes climáticos, como altas temperaturas y exceso de humedad y resistencia a deformaciones y fatiga originados por el aumento del nivel de tráfico.

El caucho puede ser producido específicamente para los pavimentos o recuperado de neumáticos de vehículos; los cauchos utilizados como modificador de la mezcla son cauchos naturales o de látex y sintéticos, SBS y SBR. Para utilizar residuos de neumáticos en desuso estos deben ser triturados, luego se separa el caucho del acero y las fibras y se gradúan los restos con distintas granulometrías.

El caucho de las llantas usadas puede ser incorporado en las mezclas asfálticas por medio de dos métodos diferentes denominados proceso húmedo y proceso seco. En el proceso húmedo, el caucho actúa modificando el ligante, mientras que en el proceso seco el caucho es usado como una porción de agregado fino.¹³

¹³ LADINO, Ingryd; RAMÍREZ, Armando; ROSAS, Juan Pablo. *Diseño de mezcla asfáltica con asfalto caucho tecnología GAP Graded para la Ciudad de Bogotá*. p. 16.

1.9. Clasificación de las mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas se clasifican según una gama muy amplia de parámetros, las más importantes son:

1.9.1. Según la temperatura de puesta en obra

- **Calientes:** son la mezcla de agregados pétreos con un aglomerante asfáltico, sea cemento asfáltico o cemento asfáltico modificado con polímeros elaborada mediante un procedimiento controlado. Estas mezclas se elaboran calentando el bitumen y los agregados de modo que se produzca una viscosidad cinemática entre 0,15 y 0,19 Pascales-segundo, Pa-s y su temperatura nunca debe exceder los 165 °C o la temperatura especificada en el diseño, es importante que los agregados se calienten antes de mezclarse para que el bitumen no se enfríe al entrar en contacto con estos. La colocación en obra también debe realizarse a una temperatura superior a la del ambiente.
- **Semicalientes:** son las mezclas que debido a determinados procesos pueden ser fabricadas a temperaturas menores que las mezclas en caliente, en un rango aproximado de 30 °C menos tanto en la fabricación como en la colocación. Surge como alternativa para la reducción de emisión de gases de efecto invernadero que se hacen presentes durante la fabricación de la mezcla, además beneficia en la reducción del envejecimiento de la mezcla.
- **Frías:** las mezclas asfálticas en frío son una combinación de rocas o gravas trituradas con bitumen rebajado o emulsificado a través de un procedimiento controlado cuya textura puede ser abierta o cerrada, la

puesta en obra se realiza a temperatura ambiente, práctica comúnmente realizada durante el mantenimiento y construcción de carreteras secundarias.

1.9.2. Según la proporción de vacíos

La proporción de vacíos es un parámetro importante para que no se produzcan grandes deformaciones plásticas debido a variaciones térmicas y el estado de servicio.

- Cerradas o densas: este tipo de mezclas tiene una proporción de vacíos con un rango menor al 6 %.
- Semidensas: las mezclas semidensas tienen una relación de vacíos entre 6 % y 10 %.
- Abiertas: las mezclas abiertas tienen una proporción de vacíos entre 12 % y 18 %
- Porosas o drenantes: las mezclas asfálticas drenantes tienen una proporción de vacíos superior a 18 %, por lo regular la proporción se encuentra en torno al 25 %.

1.9.3. Según el tamaño nominal máximo del agregado

- Gruesas: son las mezclas cuyo tamaño nominal del agregado grueso es mayor a 3/8".

- Finas: también se les conoce como morteros asfálticos, están compuestos de agregado fino, polvo mineral y bitumen, el tamaño máximo varía de un tercio a un medio del espesor de la capa donde se aplicará.

1.9.4. Según la estructura del agregado

- Con esqueleto mineral: estas mezclas se caracterizan por tener una alta resistencia a la fricción interna entre los agregados.
- Sin esqueleto mineral: no tienen un esqueleto mineral muy resistente, su capacidad se debe en mayor parte a la masilla asfáltica.

1.9.5. Por la granulometría

- Mezclas continuas: las mezclas continuas tienen una granulometría con distribución adecuada de los distintos tamaños de agregado que requiere la mezcla.
- Mezclas discontinuas: las mezclas discontinuas tienen una granulometría limitada, no tienen una distribución completa de los tamaños de las partículas.

2. PAVIMENTOS DE CONCRETO ASFÁLTICO DRENANTE

Los pavimentos de concreto asfáltico drenante se consideran dentro de los sistemas urbanos de drenaje sostenible SUDS o buenas prácticas ambientales BMP's como sistemas de infiltración y control de escorrentía.

El uso de superficies drenantes o porosas surgió de la necesidad de aliviar la contaminación que provoca el vertido en los sistemas de saneamiento en eventos de lluvia torrencial, además de la reducción de la escorrentía superficial urbana. El uso de este tipo de superficies beneficia en la reducción de los parámetros de diseño de la infraestructura de drenajes y mejora la calidad del agua incluso para su reutilización. Las mezclas asfálticas drenantes demostraron ser un material adecuado para este tipo de superficie.

Las mezclas drenantes son aquellas mezclas asfálticas cuyo porcentaje de vacíos es lo suficientemente alto para permitir que a través de ellas se filtre el agua con rapidez y pueda ser evacuada hacia las bermas, cunetas u otros elementos de drenaje, evitando así su permanencia en la superficie de la vía (capa de rodadura), incluso bajo precipitaciones intensas y prolongadas.¹⁴

Estas mezclas pueden elaborarse en caliente tanto como en frío, utilizando cemento o emulsiones asfálticas como ligante.

¹⁴ JUYAR MORA, Germán; PÉREZ CELY, Gabriel. Comparación de mezclas asfálticas drenantes fabricadas con asfalto modificado y sin modificar. p. 77.

2.1. Características de una mezcla asfáltica drenante

Para que una mezcla pueda clasificarse como drenante debe tener la permeabilidad adecuada que caracteriza este tipo de mezclas, esto se consigue con el porcentaje de vacíos de la mezcla. El objetivo de las mezclas drenantes es tener la mayor cantidad de relación de vacíos sin comprometer la integridad estructural, la comodidad de los usuarios y el costo de fabricación de este tipo de pavimento.

2.1.1. Permeabilidad

El alto contenido de vacíos en las mezclas drenantes hace posible tener una estructura interna de huecos interconectados que permite el paso del agua a través de si, para que pueda ser evacuada de la superficie hacia los elementos laterales de drenaje. Existe una relación inversa en cuanto a la permeabilidad y el contenido de asfalto incorporado a la mezcla ya que al aumentar el contenido de asfalto genera un taponamiento en los huecos y retarda el paso del agua.

2.1.2. Porcentaje de vacíos

. El contenido de vacíos debe ser como mínimo de 18 % para que la capacidad de drenar de la rodada se mantenga estable con el tiempo sin que sufra un asolvamiento prematuro y suele encontrarse en el orden de un 25 %. Esto se obtiene utilizando áridos gruesos en mayor cantidad, reduciendo lo finos y agregando llenante de polvo mineral, esta granulometría especial permite que dentro de la estructura de la carpeta se creen estos espacios vacíos.

2.1.3. Contenido de bitumen asfáltico

El uso de cemento asfáltico convencional ha demostrado ser económicamente inviable para este tipo de pavimentos, por lo que normalmente se utilizan bitúmenes modificados con elastómeros. El contenido de bitumen variará según el porcentaje de polímero incorporado al asfalto modificado y la cohesión que se necesite alcanzar.

El porcentaje óptimo de asfalto varía entre 4.5% y el 5%, con un porcentaje de polímero que varía entre el 2% y el 3%, debido a que el mayor incremento del mismo no representa una mejora considerable en la pérdida de desgaste.¹⁵

2.1.4. Resistencia a la disgregación

La resistencia a la disgregación es uno de los criterios fundamentales del diseño de las mezclas asfálticas drenantes. Esta característica se logra mejorando la cohesión entre las partículas de los áridos de la mezcla, usando un ligante que sea capaz de resistir la fuerza de succión que se genera entre el neumático y la carpeta. Para lograr eso se debe aumentar el contenido de agregado fino y ligante en la mezcla.

2.2. Ventajas y limitaciones del concreto asfáltico drenante

Los pavimentos asfálticos drenantes tienen características distintas a los pavimentos flexibles convencionales, lo que les permite desarrollar ventajas sobre estos al igual que se hacen presentes ciertas limitaciones en cuanto a su uso.

¹⁵ JUYAR MORA, Germán; PÉREZ CELY, Gabriel. Comparación de mezclas asfálticas drenantes fabricadas con asfalto modificado y sin modificar. p. 84.

2.2.1. Ventajas

- Elimina el fenómeno de hidroplaneo. Los pavimentos drenantes tienen la capacidad de mantener libre de agua la superficie de rodada, lo que le da a los vehículos una mayor una mayor oposición al deslizamiento en presencia de lluvia, ya que reduce o elimina el fenómeno de hidroplaneo o *acuaplaning*. “Al presentarse el fenómeno de hidroplaneo se produce una pérdida total del control sobre la dirección del vehículo, el existir una película de agua entre los neumáticos y la capa de rodadura”¹⁶. Esta película de agua disminuye la adherencia entre la rodada y el neumático, al reducir la probabilidad de que se forme esta película se reduce la posibilidad de accidentes.
- Mejora la resistencia al deslizamiento. El alto contenido de vacíos en la mezcla provoca un aumento en la macrotextura del pavimento, este parámetro fundamentalmente brinda a los vehículos una mayor resistencia al deslizamiento a altas velocidades.
- Elimina la dispersión de agua. En época lluviosa los vehículos producen proyecciones de agua que salen de los neumáticos, estas reducen la visibilidad y manejabilidad, las mezclas drenantes reducen hasta prácticamente eliminar la dispersión del agua, incluso bajo eventos climáticos prolongados como lluvias torrenciales.
- Mejora la visibilidad. Los pavimentos flexibles convencionales tienen una macrotextura lisa que, en presencia de agua, producen que la luz de los vehículos que se dirigen en sentido contrario se refleje. Durante la noche

¹⁶ JUYAR MORA, Germán; PÉREZ CELY, Gabriel. *Comparación de mezclas asfálticas drenantes fabricadas con asfalto modificado y sin modificar*. p. 78.

este reflejo produce un deslumbramiento en los conductores. Al eliminar la presencia de agua en la superficie se reduce la reflexión y mejora la visibilidad de la señalización horizontal de la carretera.

- Absorbe el ruido de rodada. La macrotextura lisa o la que se produce por la formación de concavidades en la superficie, reduce el ruido de rodada. Sin embargo, la estructura porosa de los pavimentos drenantes brinda un tratamiento acústico que absorbe de forma más eficiente el ruido total provocado por los vehículos.
- Comportamiento mecánico adecuado. A pesar de la baja estabilidad a nivel de laboratorio, el comportamiento interno del sustrato mineral y la cohesión evitan la deformación plástica durante la vida útil del pavimento cuando se coloca en capas menores a cinco centímetros. La cohesión entre los finos y el bitumen mantienen la unión de la mezcla e impiden las pérdidas por desgaste en el agregado grueso.

2.2.2. Limitaciones

- Pérdida de permeabilidad. La reducción o pérdida parcial de permeabilidad puede ocasionarse por la acción de múltiples factores como el polvo, la suciedad, derrumbes de los taludes, tráfico o derrame de combustibles y aceites que pueden producir colmatación.
- Disminución de propiedades mecánicas bajo la acción de disolventes derivados del petróleo. Es muy frecuente que en las pendientes pronunciadas de las carreteras o estacionamientos se derramen productos disolventes y derivados del petróleo que puede afectar las propiedades mecánicas del pavimento drenante, esto se debe a que estos productos

pueden penetrar la totalidad de la rodada por la naturaleza de su estructura de huecos interconectados.

- Requiere una capa impermeabilizante. La mezcla asfáltica drenante debe colocarse sobre una capa completamente impermeable para no afectar la integridad estructural de la base que la sostiene.
- Mayor costo inicial. El uso de asfaltos modificados y agregados de superior calidad aumenta el costo directo del proyecto en comparación con los asfaltos flexibles convencionales, tanto su construcción como el mantenimiento.
- Drenaje Lateral. El agua que se almacena en la estructura porosa de los pavimentos drenantes debe ser evacuada por medio de drenajes laterales, lo que implica el diseño y construcción de obras de arte como canales.

2.3. Elementos que integran un pavimento de concreto asfáltico drenante

2.3.1. Subrasante

Se define como la preparación y compactación del suelo para recibir y soportar la totalidad de las cargas que transmite la estructura de un pavimento. Los materiales que se utilizan para la subrasante se seleccionan de acuerdo a las propiedades físico-mecánicas, las especificaciones del proyecto y el control de calidad.

La calidad de una subrasante se determina a través de ensayos dinámicos y de aplicación de cargas repetitivas, lo que permite demostrar de mejor manera

el comportamiento del pavimento cuando se desea evaluar su capacidad de resistir tensiones y deformaciones.

La subrasante “es la capa en la que se apoya la estructura del pavimento y la característica especial que define la propiedad de los materiales que componen la subrasante, se conoce como módulo de Resiliencia (Mr)”¹⁷. La calidad del suelo de una subrasante se puede determinar con los siguientes valores:

- Módulo de resiliencia
- Módulo de elasticidad
- Valor soporte del suelo, CBR
- Módulo de reacción de la subrasante
- Granulometría
- Densidad, Proctor
- Límites de Atterberg

Estas propiedades son invariables a través del tiempo y son factores determinantes en el diseño de la estructura de un pavimento. Sin embargo, existen procedimientos que permiten mejorar estas propiedades tales como mezclas con otros materiales como cemento, cal o químicos y procedimientos de estabilización.

2.3.2. Sub-base

Las sub-base es la capa de la estructura de pavimento destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas a la superficie de rodadura de pavimento, de tal manera que la capa de

¹⁷ CORONADO ITURBIDE, Jorge. *Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos*. Cap. 4. p. 1.

subrasante la pueda soportar absorbiendo las variaciones inherentes a dicho suelo que puedan afectar a la subbase.¹⁸

Esta capa de transición controla los cambios de volumen y funciona como capa de drenaje, controlando la capilaridad gracias a su composición de materiales granulares.

El material que compone la subbase debe tener un mayor valor soporte del suelo que la subrasante, su espesor varía dependiendo de las condiciones y características de la capa inferior, el tamaño de las piedras debe ser menor a 2/3 del espesor de la capa y estar libre de impurezas como materia orgánica, terrones de arcilla y cualquier otro material que represente un riesgo a la integridad estructural que debe brindar esta capa.

2.3.3. Base

La base es la capa de pavimento que tiene como función primordial, distribuir y transmitir las cargas ocasionadas por el tránsito, a la subbase y a través de esta a la subrasante, y es la capa sobre la cual se coloca la capa de rodadura.¹⁹

Usualmente las bases se especifican en dos tipos: granular y estabilizada.

- Base granular. Está constituida por material de buena calidad, piedra o grava triturada y mezclada con arena y suelo en estado natural. La estabilidad depende de la forma, densidad y cohesión de las partículas considerando la proporción de finos.

¹⁸ CORONADO ITURBIDE, Jorge. *Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos*. Cap. 5. p. 3.

¹⁹ CORONADO ITURBIDE, Jorge. *Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos*. Cap. 5. p. 4.

- Base estabilizada. Es la combinación de piedra, grava y material de relleno mezclado con productos estabilizadores o materiales para mejorar la estabilidad y resistencia empleando técnicas de estabilización. Los productos más comunes para estabilizar la base son: cemento portland, cal, materiales bituminosos y compuestos químicos y orgánicos basados en resinas sintéticas solos o combinados con otros de los productos estabilizadores.

2.3.4. Geotextiles

“El uso de las mezclas porosas cambia radicalmente el concepto tradicional de una carpeta de rodado impermeable traspasando la función de proteger de los efectos negativos del agua a la capa subyacente”²⁰. Esta capa inferior debe ser impermeable de modo que permita que el agua escurra hacia los elementos de drenaje laterales.

Los geotextiles pueden ser empleados de distintas formas en los pavimentos drenantes. Pueden ser colocados entre la subrasante y la subbase como filtro y separación cuando el pavimento tiene el propósito de ser un medio de infiltración, o si se busca crear un volumen de estanco del agua infiltrada. Por otro lado, cuando no es posible la infiltración se colocan como un medio impermeabilizante sobre las capas de material granular bajo la rodada, de modo que evite el paso del agua y asegure un sellado total sobre la base, para que el agua infiltrada escurra fuera de la estructura del pavimento, esto se logra aplicando un riego de liga sobre el geotextil.

²⁰ FLORES, Lesser; PUENTE, Rebeca; MAGAÑA, Raúl. *Diseño de mezcla asfáltica semicaliente drenante en El Salvador*. p. 61.

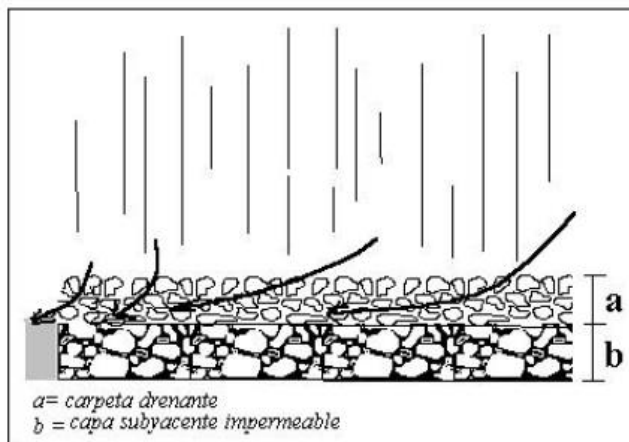
2.3.5. Capa de rodadura

La capa de rodadura es la que recibe directamente las cargas, debe ser capaz de resistir los efectos de abrasión que produce el tráfico de diseño y tener una agradable apariencia.

La capa porosa drena el agua fuera de la superficie, mejora la visibilidad, aumenta la tracción, y reduce el ruido y el resplandor, además hace el pavimento más seguro y aumenta su capacidad de transportar grandes cantidades de tráfico y obviar los costos de la ampliación de la carretera.²¹

Cuando se desea colocar una capa drenante sobre un pavimento preexistentes se considera como un revestimiento. Se debe realizar un riego de liga para conseguir una mejor impermeabilización y una mayor adherencia con la capa inferior.

Figura 6. Mezcla drenante colocada sobre una carpeta preexistente



Fuente: MUÑOZ, Gabriela, RUIZ, Consuelo. *Metodología de diseño y colocación de mezclas drenantes*. p. 2.

²¹ QUIROZ, Diana y TRUJILLO, Alejandra. *Pavimentos porosos utilizados como sistemas alternativos al drenaje urbano*. p. 21.

2.4. Patología en pavimentos asfálticos drenantes

Las fallas en los pavimentos drenantes se dan principalmente por dos causas:

- **Disgregación.** Es el desprendimiento de partículas de la carpeta asfáltica producto de los esfuerzos tangenciales de succión que produce el paso del tráfico. Se identifica con la aparición de baches y pérdida de la regularidad en la superficie tanto en sentido longitudinal como en transversal. Por lo general ocurre en lugares donde ha sido subcompactada o el bacheo se hizo con mezcla en frío.
- **Colmatación.** Todas las superficies porosas pierden su permeabilidad con el tiempo, esto es ocasionado por el arrastre y acumulación de sedimentos como el polvo, arena, materia orgánica, en la estructura interna del pavimento, ocasionando que se reduzca la cantidad de huecos interconectados que le dan a la mezcla la capacidad de drenar. El tiempo de colmatación depende del entorno en el cual se encuentra el pavimento, es más probable que pierda permeabilidad más rápido en zonas rurales que en zonas urbanas o autopistas.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1. Normas aplicables al diseño de mezclas asfálticas drenantes

El Instituto Nacional de Vías del Ministerio de Transportes de Colombia presenta estándares para la elaboración del diseño de la mezcla asfáltica drenante y la determinación de sus características físico-mecánicas y volumétricas. Para el desarrollo del diseño de mezcla se tomó como punto de comparación las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos del Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda de la República de Guatemala. En el artículo 453-13 de las normas y especificaciones del INVIAS se encuentran los lineamientos, procedimientos y especificaciones para la preparación, compactación y evaluación de la mezcla asfáltica drenante preparada en caliente.

3.2. Caracterización de los Agregados

Los agregados pétreos se caracterizan de la siguiente forma:

Tabla V. Denominación de los agregados minerales

TIPO DE AGREGADO	DESCRIPCIÓN
Agregado Grueso	Retenido en el Tamiz de 4.75 mm
Agregado Fino	100% pasa el tamiz 4.75 mm
Polvo Mineral	Graduación según AASTHO M 17

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes*. Edición 2001. Sección 401.03. p. 401-2.

Los agregados pétreos y llenante mineral no deben estar alterados por ningún tipo de meteorización o modificación fisicoquímica apreciable bajo las condiciones más desfavorables que puedan ocurrir en el lugar donde se usen. De modo que no sea motivo por el cual se desprendan del material asfáltico por la acción del agua o del tránsito.

Tabla VI. **Niveles de tránsito**

NIVEL DE TRÁNSITO	NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES DE 80 kN EN EL CARRIL DE DISEÑO, N_{80kN} , MILLONES
NT1	$N_{80kN} \leq 0.5$
NT2	$0.5 < N_{80kN} \leq 5.0$
NT3	$N_{80kN} > 5.0$

Fuente: Instituto Nacional de Vías de Colombia. *Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras*. Edición 2012. Sección 100.2. p. 100-2.

Tabla VII. **Requisitos aplicables a los agregados para mezcla drenante**

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	NIVEL DE TRÁNSITO
		NT2 Y NT3
Dureza , agregado grueso (o)		
Desgaste en la máquina de los Ángeles, máximo (%)	E-218	25
- 500 revoluciones		5
- 100 revoluciones		
Durabilidad (o)		
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de sodio, máximo (%)	E-220	18
Geometría de las partículas, agregado grueso (o)		
Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo (%)	E-240	10
Caras fracturadas, mínimo (%): dos caras	E-227	100
Limpieza, gradación combinada (F)		
- Equivalente de Arena, mínimo (%)	E-133	50

Fuente: Instituto Nacional de Vías de Colombia. *Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras*. Edición 2012. Sección 453.2.1.1. p. 453-2.

- Agregado grueso:

El agregado grueso debe originarse de la trituración de roca o grava, cuyos fragmentos deben ser limpios, resistentes y bajos en contenido de partículas planas, alargadas, blandas o que se desintegren; no debe contener tierra, terrones de arcilla o cualquier otra sustancia que afecte a su adherencia al asfalto.

- Agregado fino:

El agregado fino puede estar constituido por arena producto de trituración de piedra de cantera o una mezcla de trituración con arena natural. Las partículas de la arena deben ser de superficie rugosa, angular y limpia de cualquier superficie que afecte su adhesión con el asfalto. La proporción de arena natural no puede exceder los valores de la siguiente tabla:

Tabla VIII. **Proporción máxima de arena natural en el agregado**

CARACTERÍSTICA	NIVEL DE TRÁNSITO	
	NT2	NT3
Proporción de arena natural: % de la masa total del agregado combinado	≤ 10	0
Proporción de arena natural: % de la masa total del agregado fino	≤ 50	0

Fuente: Instituto Nacional de Vías de Colombia. *Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras*. Edición 2012. Sección 453.2.1.2. p. 453-3.

El llenante mineral, *filler* puede originarse como producto de trituración de agregados pétreos o puede ser un aporte como cal hidratada o cemento

hidráulico. La proporción debe cumplir los requisitos indicados en la siguiente tabla:

Tabla IX. **Proporción y requisitos de llenante mineral**

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	NIVEL DE TRÁNSITO	
		NT2	NT3
Proporción de llenante mineral de aporte: (% en masa del llenante total)	-	100	
Granulometría del llenante mineral de aporte: - % que pasa tamiz 425 μm (No. 40) - % que pasa tamiz 150 μm (No. 100) - % que pasa tamiz 75 μm (No. 200)	E -215	100 > 90 > 75	
Densidad bulk (g/cm^3)	E-225	0.5 a 0.8	
Vacíos del llenante seco compactado (%)	E-229	≥ 38	

Fuente: Instituto Nacional de Vías de Colombia. *Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras*. Edición 2012. Sección 453.2.1.3. p. 453-3.

La graduación de la granulometría del conjunto de agregados pétreos se debe ajustar a la siguiente tabla:

Tabla X. **Graduación**

TIPO DE MEZCLA	TAMIZ (mm / U.S. Standard)						
	19.0 3/4"	12.5 1/2"	9.5 3/8"	4.75 No. 4	2.00 No. 10	0.425 No. 40	0.075 No. 200
ÚNICA	% PASA						
	100	70-100	50-75	15-32	9-20	5-12	3-7
TOLERANCIAS EN PRODUCCIÓN SOBRE LA FÓRMULA DE TRABAJO (\pm)	4 %			3 %			1 %

Fuente: Instituto Nacional de Vías de Colombia. *Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras*. Edición 2012. Sección 453.2.1.4. p. 453-4.

Para garantizar los niveles de resistencia y compactación, el material pétreo debe formar una curva granulométrica paralela a los límites de la franja sin saltos bruscos entre tamices.

3.3. Material bituminoso

El material bituminoso para elaborar la mezcla asfáltica debe ser cemento asfáltico modificado con polímeros tipo I, elastómeros de Estireno-Butiadieno-Estireno según la AASHTO.

3.4. Diseño de mezcla de pavimentos drenantes

Las mezclas drenantes se diseñaron a partir de probetas cilíndricas tipo Marshall como se describe en la norma INV E-760. Se determinó una temperatura de mezcla de 150 °C de modo que se obtuvo un recubrimiento adecuado del agregado sin escurrimientos.

El contenido óptimo de bitumen se determinó apoyándose en los criterios establecidos en el artículo 453.4.2:

- Porcentaje de vacíos: el porcentaje de vacíos con aire de la mezcla compactada deben ser superiores a 18 % y menores que 25 %.
- Permeabilidad: se debe realizar una prueba de permeabilidad para asegurar que los vacíos estén conectados; colocando 100 ml de agua en una probeta prehumedecida, la cual debe cruzar en un tiempo menor a 15 segundos midiendo así su capacidad de drenaje.

- Desgaste: las pérdidas por desgaste deben ser menores al 25 % determinado según se describe en la norma INV E-760.
- Dosificación: el contenido de bitumen de la mezcla debe ser al menos 4,5 % de la masa seca de los agregados.
- Adhesividad: se debe comprobar la adhesividad del ligante con los agregados en presencia de agua luego de un proceso de inmersión por veinticuatro horas a 60 °C. El desgaste debe ser menor al 40 % determinado según la norma INV E-760.

3.5. Ensayos para mezclas asfálticas drenantes

3.5.1. Compactación de probetas tipo Marshall: INV E-748

Los procedimientos para la confección y compactación de probetas tipo Marshall se encuentran en el anexo 2.

3.5.2. Gravedad específica máxima de mezclas asfálticas para pavimentos: INV E-735-13

Esta norma describe los procedimientos para determinar la gravedad específica máxima a 25 °C de mezclas asfálticas en caliente para pavimentos.

- Equipo:
 - Picnómetros de vacío con diámetro entre 180 y 260 mm y una altura no menos de 160 mm. Deben tener una tapa transparente de modo

que se pueda observar la liberación de burbujas de aire estando asegurada con un empaque y conexión para aplicar vacío.

- Balanza
- Bomba de vacío o aspirador de agua capaz de generar una presión residual de 4,0 kPa
- Manómetro de presión residual o celda de presión absoluta
- Manómetro de vacío
- Termómetros
- Baño de agua
- Válvula de purga
- Dispositivo de agitación mecánica
- Horno

Figura 7. **Balanza y picnómetro**



Fuente: [Fotografía de Denis Caleb Alvarado]. (Laboratorio de asfaltos del CII, Campus Central USAC, 2022). Colección particular. Guatemala.

- Procedimiento para obtener gravedad específica máxima de mezclas asfálticas:
 - Estando seca y tibia la muestra, se separan a mano las partículas procurando no fracturarlas y se deja que la muestra se enfríe a temperatura ambiente.
 - Se vierte la muestra en el picnómetro tarado y se pesa el recipiente con la muestra y se designa como la masa neta, solo la de la muestra, como A.
 - Se agrega agua a 25 °C para cubrir la muestra por completo y se coloca la tapa. Se coloca el picnómetro con la muestra y agua sobre el dispositivo de agitación mecánica para retirar el aire atrapado. La agitación y vacío se aplican durante 15 minutos. Al finalizar se libera la presión de vacío usando la válvula.
 - Se llena lentamente el picnómetro con agua procurando no introducir aire en la muestra. Se anota la temperatura del agua y se llena por completo cuidando de no dejar burbujas de aire atrapadas. Luego se determina la masa del picnómetro más la tapadera más la muestra más el agua y se designa como E. La masa del picnómetro lleno de agua a 25 °C se designa como D.
 - Se calcula la gravedad específica máxima de la muestra con la siguiente ecuación:

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

Donde:

A= Masa en el aire de la muestra seca, g;

D= Masa del picnómetro lleno de agua a 25 °C, g;

E= Masa del picnómetro más agua más muestra a 25 °C, g;

Figura 8. **Picnómetro conectado a bomba de vacío y equipo de agitación**



Fuente: [Fotografía de Denis Caleb Alvarado]. (Laboratorio de asfaltos del CII, Campus Central USAC, 2022). Colección particular. Guatemala.

3.5.3. Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas: INV E-736-13

Esta norma contiene los procedimientos para la determinación del porcentaje de vacíos con aire de las mezclas asfálticas densas y abiertas compactadas en laboratorio o de núcleos extraído de capas asfálticas colocadas.

La densidad bulk se obtiene de una probeta de mezcla asfáltica drenante compactada, a partir de su masa seca en gramos y su volumen en centímetros cúbicos.

- Procedimiento para obtener densidad bulk para mezclas asfálticas drenantes:

- Se determina la masa seca de la probeta pesándola en aire.
- Se mide la altura de la probeta en cuatro puntos distintos y se calcula el promedio.
- Se mide el diámetro de la probeta en cuatro puntos distintos y se calcula el promedio.
- Se calcula el volumen de la probeta con base en los valores promedio de diámetro y altura por medio de la ecuación para determinar el volumen de un cilindro:

$$V = \frac{\pi}{4} * \varnothing^2 * h$$

Donde:

V = volumen de la probeta, mm³

∅ = diámetro promedio de la probeta, mm

h = altura promedio de la probeta, mm

Se calcula la densidad bulk de la probeta en g/cm³ con la siguiente ecuación:

$$\text{densidad bulk} = \frac{M * 10^3}{V}$$

Donde:

M = masa seca de la probeta pesada en el aire, g

V = Volumen, mm³

Figura 9. Toma de dato de masa de probeta en aire



Fuente: [Fotografía de Denis Caleb Alvarado]. (Laboratorio de asfaltos del CII, Campus Central USAC, 2022). Colección particular. Guatemala.

- Procedimiento para obtener gravedad específica Bulk para mezclas asfálticas drenantes:

La gravedad específica bulk se obtiene con la siguiente ecuación:

$$G_{mb} = \frac{\text{densidad bulk}}{\rho_{\text{agua}}}$$

Donde:

G_{mb} = gravedad específica bulk

ρ_{agua} = 0,99707

- Descripción de la metodología para obtener gravedad específica máxima de mezclas asfálticas.

La gravedad específica máxima de la mezcla se determina según la norma INV E-735, usando una mezcla con las mismas características de granulometría, agregados y tipo y contenido de asfalto.

- Procedimiento para obtener porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas drenantes compactadas:

El porcentaje de vacíos con aire de la mezcla asfáltica compactada respecto al volumen total se calcula con la siguiente ecuación:

$$V_A = \left[1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right] \times 100$$

Donde:

V_A = Porcentaje de vacíos con aire de la mezcla compactada respecto del volumen

G_{mm} = Gravedad específica máxima

G_{mb} = Gravedad específica bulk del espécimen compactado

3.5.4. Caracterización de las mezclas asfálticas abiertas por medio del ensayo cántabro de pérdida por desgaste: INV E-760-13

Esta norma contiene los procedimientos para determinar el valor de la pérdida por desgaste de las mezclas asfálticas empleando la máquina de Los

Ángeles. Este procedimiento es aplicable a mezclas asfálticas en caliente de granulometría abierta cuyo agregado tenga un valor nominal máximo de 1 pulgada.

El enfoque principal es poder evaluar, de forma empírica, la resistencia de la mezcla a la disgregación ocasionada por los efectos abrasivos y de succión generados por el tránsito.

El ensayo consiste en confeccionar probetas tipo Marshall con la mezcla que se quiere estudiar, compactadas con 50 golpes por cara e introducir las en la máquina de Los Ángeles, sin la carga abrasiva. Luego de un número determinado de revoluciones se saca la probeta y se pesa obteniendo como resultado el valor de pérdida por desgaste expresada en porcentaje.

- Equipo
 - Equipo de compactación conformado por molde, collarín, placa base y martillo de compactación Marshall según INV E – 748 o NTG 51005 h21:2019
 - Máquina de los Ángeles
 - Termómetros
 - Balanzas
 - Horno
 - Elementos misceláneos como bandejas, espátulas y guantes termoaislantes

Figura 10. **Equipo de compactación**



Fuente: [Fotografía de Denis Caleb Alvarado]. (Laboratorio de Mecánica de Suelos, Campus Central USAC, 2022). Colección particular. Guatemala.

- **Procedimiento para la preparación de probetas tipo Marshall**

Para este método de ensayo se deben preparar al menos cuatro probetas con cada contenido de bitumen a evaluar.

- Los agregados que componen la mezcla, según la graduación granulométrica propuesta se deben secar en el horno hasta una masa constante a una temperatura de 110 °C.
- La temperatura de mezcla y compactación de las probetas debe determinarse de modo que exista un recubrimiento adecuado del bitumen sobre los agregados.
- En un recipiente tarado deben agregarse las cantidades de agregado de cada fracción definidas según la granulometría propuesta de modo que el total de material sea al menos 1 000 g.

El resto de la preparación es el indicado en la norma INV E-748 para fabricación de probetas Marshall.

- La energía de compactación de la mezcla debe ser de 50 golpes por cara utilizando el equipo descrito en la norma INV E-748.
- Luego de retirar el molde de las probetas, se determina su densidad y contenido de vacíos con aire.

Figura 11. **Fracción de agregados en recipiente tarado**



Fuente: [Fotografía de Denis Caleb Alvarado]. (Laboratorio de Mecánica de Suelos, Campus Central USAC, 2022). Colección particular. Guatemala.

- Procedimiento para determinar pérdida por desgaste por medio del ensayo cántabro.
 - Se debe medir la masa de cada probeta en una balanza con aproximación de 0,1 g y este valor se registra como M_1 . La temperatura de la probeta debe ser estable durante 6 horas antes de la prueba, en un rango entre 15 °C y 30 °C.

- Se introduce la probeta en el tambor de la máquina de Los Ángeles sin la carga abrasiva y se acciona la máquina a una velocidad entre 188 y 208 rad/s, de 30 a 33 rpm, hasta completar 300 vueltas.
- Al completar las vueltas, se saca la probeta del tambor y se determina de nuevo la masa y el valor se registra como M_2 .
- Este ensayo debe repetirse para cada una de las probetas preparadas.

La pérdida por desgaste de cada probeta se determina mediante la siguiente ecuación:

$$P = \left[\frac{M_1 - M_2}{M_1} \right] \times 100$$

Donde:

P = Valor de pérdida por desgaste de la probeta, %;

M_1 = Masa inicial de la probeta, g;

M_2 = Masa final de la probeta, g;

Figura 12. **Probetas de mezcla drenante antes y después del ensayo cántabro**



Fuente: [Fotografía de Denis Caleb Alvarado]. (Laboratorio de Mecánica de Suelos, Campus Central USAC, 2022). Colección particular. Guatemala.

3.5.5. Prueba de permeabilidad

- Procedimiento para la prueba de permeabilidad.
 - Se colocan 100 ml de agua a temperatura ambiente en un recipiente.
 - Estando la probeta tipo Marshall prehumedecida se coloca en un recipiente de modo que se pueda captar el agua que infiltre.
 - Se coloca un dispositivo sobre la probeta de modo que toda el agua quede solo sobre la cara superior, sin derramarse por los lados.
 - Se vierten 100 ml de agua sobre la probeta y se cuenta un tiempo de 15 segundos.
 - Al cumplirse el tiempo se remueve la probeta del recipiente y se mide el volumen que cruzo, esto es el volumen drenado en mililitros.

La permeabilidad se determina mediante la siguiente ecuación:

$$P = \frac{H}{t}$$

Donde:

P= Permeabilidad, mm/h;

H= Altura equivalente de lluvia, mm

t= tiempo de drenado, h;

La altura equivalente de lluvia se determina mediante la siguiente ecuación:

$$H = \frac{V}{A}$$

Donde:

H= Altura equivalente de lluvia, mm;

A= Área de la cara superior de la probeta, mm²

V= volumen drenado en 15 s, mm³;

El área de la cara superior se determina se determina mediante la siguiente ecuación:

$$A = \frac{\pi}{4} * \varnothing^2$$

Donde:

A= Área de la cara superior de la probeta, mm²

\varnothing = Diámetro promedio de las probetas tipo Marshall, mm;

Figura 13. **Prueba de permeabilidad**



Fuente: [Fotografía de Denis Caleb Alvarado]. (Laboratorio de Asfalto del CII, Campus Central USAC, 2022). Colección particular. Guatemala.

4. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

Se presentan los resultados obtenidos de los ensayos realizados durante el diseño de mezcla asfáltica drenante en caliente a nivel de laboratorio.

4.1. Asfalto modificado

Para el diseño de mezcla drenante se utilizó asfalto convencional AC-20 modificado con copolímeros de estireno y semi-bloques de Butadieno tipo SBS.

4.2. Granulometría del diseño de mezcla

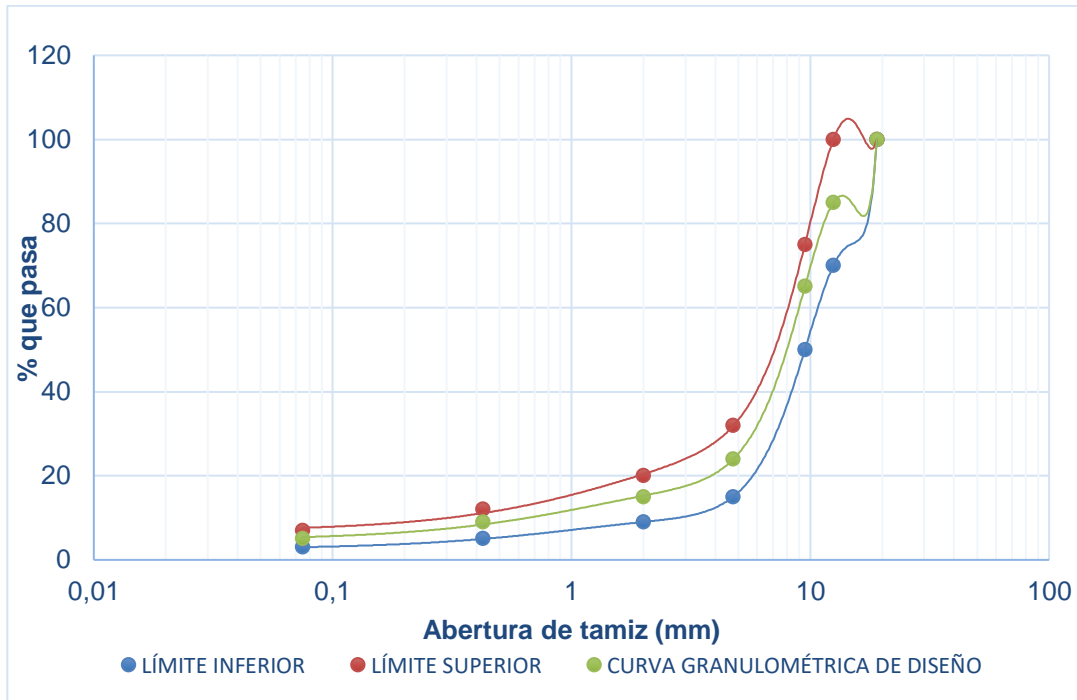
La curva granulometría se definió según los límites establecidos en la tabla X.

Tabla XI. **Granulometría de la mezcla drenante**

Tamiz	Abertura (mm)	Límite Inferior	Límite Superior	Curva Diseño	
		% que pasa	% que pasa	% que pasa	% retenido
3/4"	19	100	100	100	0
1/2"	12,5	70	100	85	15
3/8"	9,5	50	75	65	20
No. 4	4,75	15	32	24	41
No. 10	2	9	20	15	9
No. 40	0,425	5	12	9	6
No. 200	0,075	3	7	5	4
Pasa 200					5
				Total	100

Fuente: elaboración propia.

Figura 14. Curva granulométrica de diseño



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

4.3. Fabricación de probetas tipo Marshall

Se presentan los resultados obtenidos de la fabricación de probetas tipo Marshall con 50 golpes por cara, a diferentes contenidos de bitumen con respecto de la masa de los agregados, 4 probetas por contenido.

Tabla XII. **Valores promedio de altura y diámetro**

Valores promedio de altura y diámetro (mm)								
Contenido de bitumen	1		2		3		4	
	Ø (mm)	H (mm)	Ø (mm)	H (mm)	Ø (mm)	H (mm)	Ø (mm)	H (mm)
4,0 %	101,66	66,64	101,77	66,92	102,03	67,43	102,10	68,43
4,5 %	101,89	64,96	102,03	64,86	102,20	70,47	101,73	65,55
5,0 %	101,86	64,40	101,84	64,69	102,06	65,14	101,58	65,79
5,5 %	101,77	65,71	101,71	65,41	101,84	62,89	101,98	63,74
6,0 %	101,40	61,62	101,33	61,57	101,35	61,63	101,40	61,67

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Valores de masa seca de las probetas**

Contenido de bitumen	1	2	3	4
	M (g)	M (g)	M (g)	M (g)
4,0 %	1 143,20	1 120,50	1 147,30	1 117,65
4,5 %	1 105,76	1 117,27	1 183,68	1 122,20
5,0 %	1 136,19	1 148,46	1 142,48	1 150,93
5,5 %	1 147,50	1 136,68	1 192,48	1 038,46
6,0 %	1 081,41	1 075,50	1 090,50	1 045,50

Fuente: elaboración propia.

4.4. Densidad bulk de la mezcla compactada

Se presentan los resultados obtenidos del procedimiento para obtener la Gravedad Específica máxima de mezclas asfálticas para pavimentos.

Tabla XIV. **Valores de densidad bulk**

Contenido de bitumen	1	2	3	4
	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)
4,0 %	2,11	2,06	2,08	2,00
4,5 %	2,09	2,11	2,05	2,11
5,0 %	2,17	2,18	2,14	2,16
5,5 %	2,15	2,14	2,33	1,99
6,0 %	2,17	2,17	2,19	2,10

Fuente: elaboración propia.

4.5. Gravedad específica bulk de la mezcla compactada

Tabla XV. **Valores de gravedad específica bulk**

Contenido de bitumen	No. de probeta tipo Marshall			
	1	2	3	4
4,0 %	2,12	2,06	2,09	2,00
4,5 %	2,09	2,11	2,05	2,11
5,0 %	2,17	2,19	2,15	2,17
5,5 %	2,15	2,15	2,33	2,00
6,0 %	2,18	2,17	2,20	2,11

Fuente: elaboración propia.

4.6. Gravedad específica máxima de la mezcla: INV E-735

Tabla XVI. **Valores de gravedad específica máxima**

Contenido de bitumen	4,0 %	4,5 %	5,0 %	5,5 %	6,0 %
G_{mm}	2,66	2,65	2,65	2,63	2,63

Fuente: elaboración propia.

4.7. Porcentaje de vacíos con aire en la mezcla: INV E-736

Se presentan los resultados obtenidos de los procedimientos para determinar el porcentaje de vacíos con aire en la mezcla a diferentes porcentajes de la mezcla.

Tabla XVII. Valores de porcentaje de vacíos en la mezcla

Contenido de bitumen	No. de probeta				Promedio
	1	2	3	4	
4,0 %	20,2 %	22,3 %	21,4 %	24,6 %	22,12 %
4,5 %	21,0 %	20,3 %	22,5 %	20,3 %	21,02 %
5,0 %	18,0 %	17,5 %	18,8 %	18,3 %	18,15 %
5,5 %	18,2 %	18,5 %	11,3 %	24,0 %	18,03 %
6,0 %	17,2 %	17,5 %	16,4 %	20,0 %	17,75 %

Fuente: elaboración propia.

4.8. Ensayo cántabro de pérdida por desgaste a 25 °C

Se presentan los resultados obtenidos del procedimiento de ensayo cántabro de pérdida por desgaste luego de trescientas revoluciones a 25 °C para distintos contenidos de bitumen.

Tabla XVIII. Valores de desgaste por ensayo cántabro a 25 °C

Contenido de bitumen	4,0 %	4,5 %	5,0 %	5,5 %	6.0%
M ₁ , g	1 141,6	1 103,3	1 133,8	1 145,8	1 086,2
M ₂ , g	1 054,2	1 049,2	1 087,9	1 098,6	1 033,0
% de desgaste	7,7 %	4,9 %	4,0 %	4,1 %	4.9%

Fuente: elaboración propia.

4.9. Ensayo de adhesividad

Se presentan los resultados obtenidos de la prueba de adhesividad entre el agregado y el ligante, con el procedimiento de ensayo cántabro de pérdida por desgaste, luego de trescientas revoluciones a 60 °C para distintos contenidos de bitumen.

Tabla XIX. **Valores de desgaste por ensayo cántabro a 60 °C**

Ensayo cántabro a 60 °C	Contenido de bitumen				
	4,0 %	4,5 %	5,0 %	5,5 %	6,0 %
% de desgaste	34,8 %	34,7 %	14,7 %	5,1 %	4,5 %

Fuente: elaboración propia.

4.10. Pruebas de infiltración

Se presentan los resultados obtenidos de la prueba de permeabilidad en un tiempo de 15 segundos de drenaje para los distintos contenidos de bitumen.

Tabla XX. **Valores de volumen de drenado**

Volumen drenado, ml	Contenido de bitumen				
	4,0 %	4,5 %	5,0 %	5,5 %	6,0 %
	74,00	83,00	92,00	99,00	99,00
	67,00	85,00	88,00	99,00	99,00
Promedio, ml	70,50	84,00	90,00	99,00	99,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Permeabilidad de la mezcla**

Contenido de bitumen	V, ml	V, mm³	Ø, mm	A, mm²	H, mm	t, h	P, mm/h
4,0 %	70,50	70 500,00	101,37	8071,25	8,73	0,0042	2 096,33
4,5 %	84,00	84 000,00	101,37	8071,25	10,41	0,0042	2 497,75
5,0 %	90,00	90 000,00	101,37	8071,25	11,15	0,0042	2 676,16
5,5 %	99,00	99 000,00	101,37	8071,25	12,27	0,0042	2 943,78
6,0 %	99,00	99 000,00	101,37	8071,25	12,27	0,0042	2 943,78

Fuente: elaboración propia.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Resumen de resultados

Para determinar el contenido de bitumen óptimo de la mezcla asfáltica se evaluaron cuatro aspectos por medio de probetas tipo Marshall. Los aspectos evaluados para determinar el contenido óptimo de bitumen en la mezcla drenante fueron porcentaje de vacíos, permeabilidad, desgaste y adhesividad. La graduación de la curva granulométrica se construyó escogiendo el punto medio entre la franja superior e inferior de acuerdo con la tabla X.

De acuerdo con los procedimientos descritos se incorporó bitumen a la mezcla desde 4,0 % del peso de los agregados y se fue aumentando en 0,5 % hasta llegar a seis por ciento 6,0 %, esto debido a que a partir de seis por ciento la trabajabilidad de la mezcla estaba siendo afectada por el contenido de bitumen.

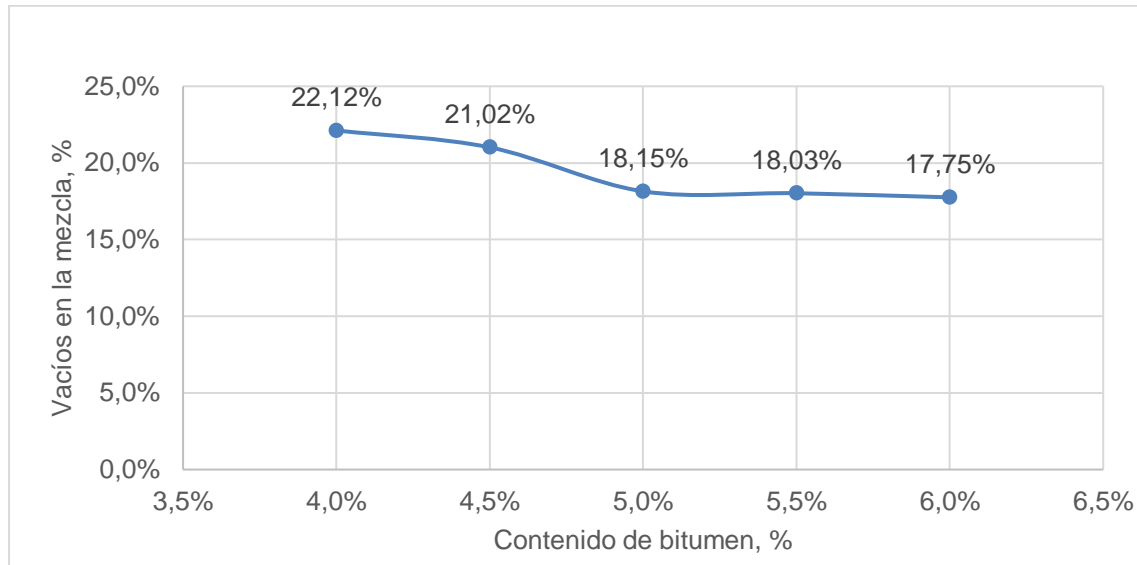
Los porcentajes de vacíos con aire en la mezcla promedios obtenidos fueron:

Tabla XXII. **Resumen de valores de porcentaje de vacíos en la mezcla**

% de vacíos	Contenido de bitumen				
	4,0 %	4,5 %	5,0 %	5,5 %	6,0 %
	22,12	21,02	18,15	18,03	17,75

Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Contenido de bitumen vs. porcentaje de vacíos en la mezcla**



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

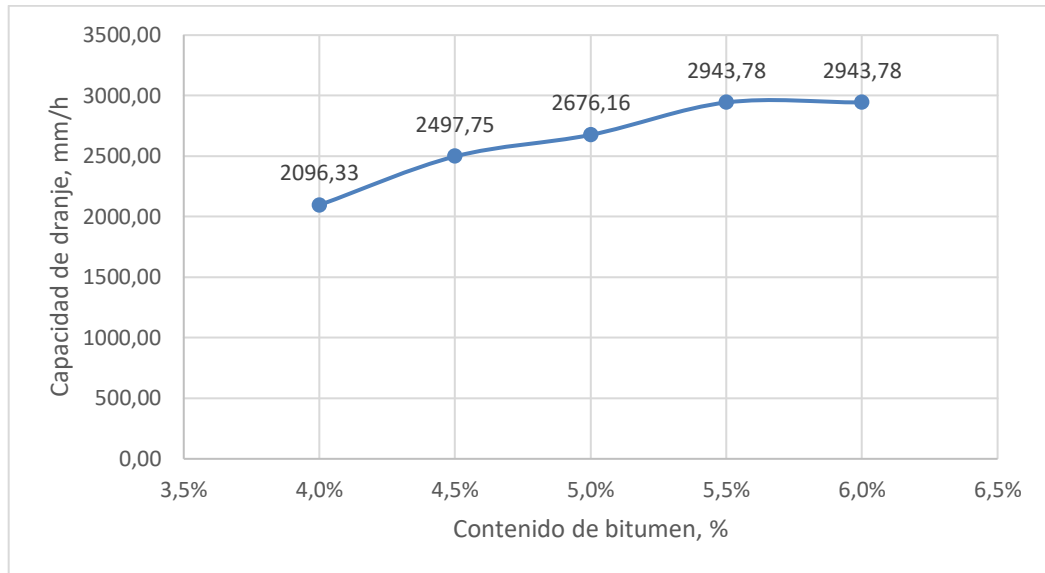
De las pruebas de permeabilidad e infiltración se obtuvieron los siguientes valores de capacidad de infiltración para los distintos contenidos de bitumen en la mezcla evaluados:

Tabla XXIII. **Resumen de valores de permeabilidad**

Contenido de bitumen	4,0 %	4,5 %	5,0 %	5,5 %	6,0 %
P, mm/h	2 096,33	2 497,75	2 676,16	2 943,78	2 943,78

Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Contenido de bitumen vs. permeabilidad**



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

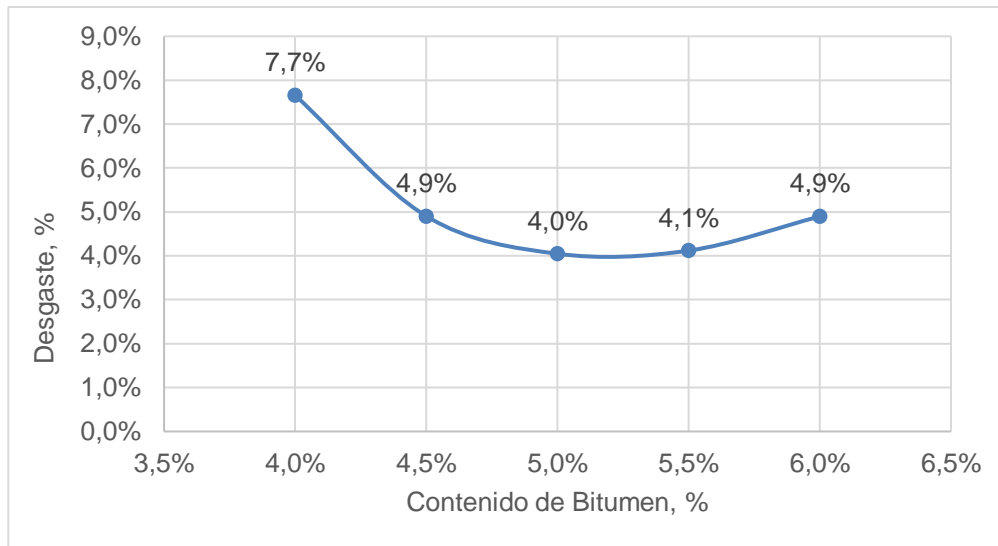
De las pruebas de desgaste por ensayo cántabro a 25 °C se obtuvieron los siguientes valores de desgaste luego de trescientas revoluciones:

Tabla XXIV. **Resumen de desgaste por ensayo cántabro a 25 °C**

Ensayo cántabro a 25 °C	Contenido de bitumen				
	4,0 %	4,5 %	5,0 %	5,5 %	6,0 %
Porcentaje de desgaste	7,7 %	4,9 %	4,0 %	4,1 %	4,9 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Contenido de bitumen vs. desgaste por ensayo cántabro a 25 °C**



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

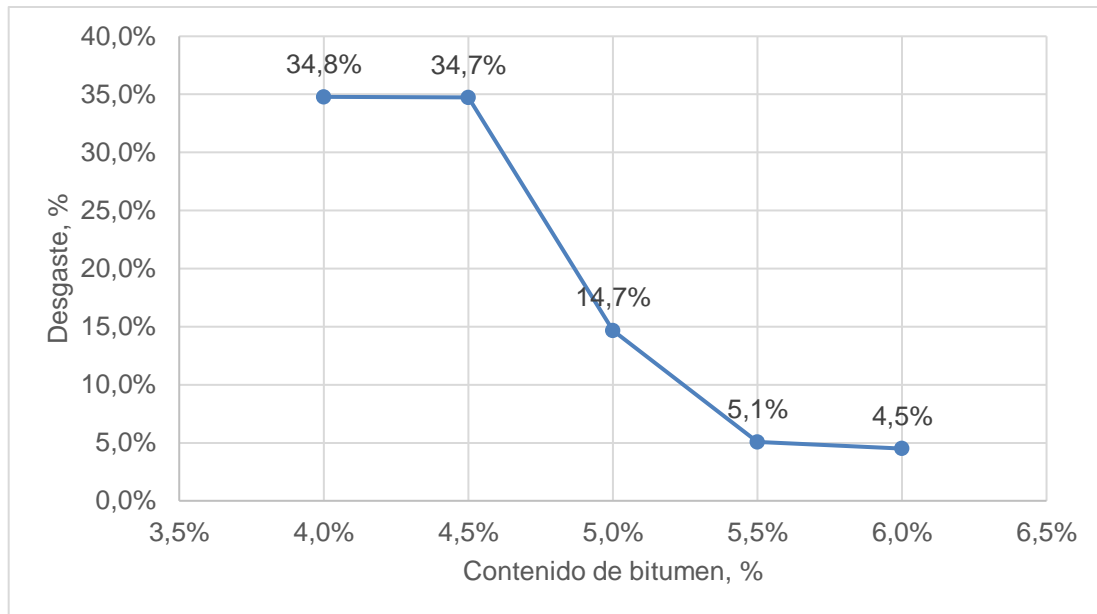
De las pruebas de adherencia por ensayo cántabro a 60 °C en presencia de agua se obtuvieron los siguientes valores de desgaste luego de trescientas revoluciones:

Tabla XXV. **Resumen de desgaste por ensayo cántabro a 60 °C**

Ensayo cántabro a 60°C	Contenido de bitumen				
	4,0 %	4,5 %	5,0 %	5,5 %	6,0 %
Porcentaje de desgaste	34,8 %	34,7 %	14,7 %	5,1 %	4,5 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Contenido de bitumen vs. desgaste por ensayo cántabro a 60 °C**



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

5.2. Análisis de resultados

Para clasificar una mezcla asfáltica como drenante su porcentaje de vacíos debe ser mayor a 18 % y menor a 25 %. Luego de realizar los ensayos se obtuvo que las probetas con contenido de bitumen de 4,0 % a 5,5 % cumplieron con este aspecto.

Para determinar la capacidad de drenaje de la mezcla debía ser capaz de drenar 100 ml de agua en un tiempo menor a 15 segundos, esto equivale, en condiciones ideales a un valor de permeabilidad de 3 000 mm/h. Luego de los ensayos se obtuvo que las probetas con contenido de bitumen de 5,5 % y 6,0 % cumplieron con la capacidad de drenaje exigida por la norma. Es importante

recalcar que la capacidad de drenaje del pavimento a diseñar se debe definir en función de las características del clima y niveles de precipitación de cada región.

Para determinar la resistencia al desgaste de la mezcla, el porcentaje de pérdidas por desgaste de la mezcla debía ser menor a 25 %. Luego de los ensayos de obtuvo que todas las probetas para los distintos contenidos de bitumen evaluado, de 4 % a 6 %, cumplen con la resistencia.

Para determinar la adherencia entre el ligante y los agregados de la mezcla, el porcentaje de pérdidas por desgaste de la mezcla en presencia de agua a 60 °C debía ser menor al 40 %. Luego de los ensayos de obtuvo que todas las probetas para los distintos contenidos de bitumen evaluado cumplen con la adherencia.

Nota: los informes de los ensayos realizados en el Laboratorio de Asfaltos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, correspondientes al Ensayo de Trabajo # 721, no fueron presentados debido a causas de fuerza mayor.

CONCLUSIONES

1. Al diseñar una mezcla para pavimentos de concreto asfáltico drenante en caliente utilizando asfalto modificado, se obtuvieron resultados satisfactorios en las características físicas, mecánicas y volumétricas que cumplen con las especificaciones para la evacuación del agua hacia los elementos de drenaje de las carreteras.
2. Evaluada la resistencia al desgaste de la mezcla asfáltica drenante por medio del ensayo cántabro se obtuvo que, los contenidos de bitumen en la mezcla de 4,0 %, 4,5 %, 5,0 %, 5,5 % y 6,0 % cumplen con la resistencia requerida por las especificaciones. Se observó que alrededor de un contenido de bitumen del 5,0 % se obtiene la resistencia máxima al desgaste de la mezcla; al aumentar el contenido de bitumen comienza a reducir su resistencia.
3. Realizados los ensayos para determinar el porcentaje de vacíos en las mezclas con distintos contenidos de bitumen, se obtuvo que las probetas de 4,0 %, 4,5 %, 5,0 % y 5,5 % cumplen con las características necesarias para ser consideradas como mezclas drenantes.
4. Luego de evaluar el porcentaje de vacíos en la mezcla, la capacidad de drenaje, la resistencia al desgaste de la mezcla y la adherencia entre el ligante y los agregados de la mezcla se obtuvo que, para las características específicas de los agregados y el bitumen usado, el contenido óptimo de la mezcla es 4,5 % ya reúne los requisitos exigidos

por el artículo 453-13 para mezclas asfálticas drenantes y permite elaborar una mezcla con el menor uso de bitumen, optimizando su costo.

5. De la evaluación de la adherencia entre el ligante y los agregados de la mezcla por medio del ensayo cántabro en presencia de agua a 60 °C se obtuvo que los contenidos de bitumen en la mezcla de 4,0 %, 4,5 %, 5,0 %, 5,5 % y 6,0 % cumplen con la resistencia requerida.
6. A partir los ensayos para evaluar la capacidad de drenaje de la mezcla con distintos contenidos de bitumen, las probetas de 5,5 % y 6,0 % cumple con la capacidad de drenaje requerida por las especificaciones.
7. En Guatemala las características del diseño granulométrico y la capacidad de drenaje de la mezcla, deben definirse de acuerdo con las características de precipitación de cada región, debido a las variaciones climáticas.
8. Al determinar el contenido óptimo de bitumen en las mezclas asfálticas drenantes debe considerarse la viscosidad de la mezcla, ya que al usarse asfalto modificado con polímeros elastómeros afecta la trabajabilidad de la mezcla a nivel de laboratorio y en su colocación en campo.

RECOMENDACIONES

1. Usar arena triturada de origen basáltico combinado con arena de origen natural para reducir el peso de la mezcla para alcanzar el porcentaje de vacíos requerido en la mezcla para el diseño presentado en este trabajo.
2. Utilizar pavimentos asfálticos drenantes como estructura de captación de aguas pluviales en lugares como parqueos, caminamientos, ciclovías, carreteras principales y secundarias; para su reutilización para riego de vegetación y limpieza de superficies.
3. Elaborar mezclas asfálticas drenantes sin utilizar asfalto convencional debido a su poca resistencia a la deformación en mezclas con altos contenidos de vacíos, lo que puede provocar disgregación de las partículas de la mezcla asfáltica.
4. Estudiar el comportamiento de las mezclas asfálticas drenantes con la incorporación de caucho reciclado como modificación en seco de la granulometría en los agregados finos.
5. Realizar el mantenimiento de los pavimentos construidos con mezcla asfáltica drenante periódicamente para mantener la capacidad de drenaje diseñada y evitar la colmatación y conservar la interconexión de los vacíos de la estructura del pavimento.

6. Considerar la elaboración de especificaciones para pavimentos drenantes en las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos.

REFERENCIAS

1. AVELLÁN CRUZ, Martha Dina. *Asfaltos modificados con polímeros*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2007. 125 p.
2. ÁVILA, Humberto. *Perspectiva del manejo del drenaje pluvial frente al cambio climático - caso de estudio: Ciudad de Barranquilla, Colombia*. Revista de Ingeniería. Universidad de Los Andes, 2012. 36, págs. 54-59. 0121-4993.
3. BARRIOS BOLAÑOS, Walter Raúl. *Guía teórica y práctica del curso de pavimentos y mantenimiento de carreteras*. Trabajo de graduación de Ing Civil. Facultad de ingeniería, Universidad San Carlos de Guatemala, 2007. 145 p.
4. BECERRA SALAS, Mario. *Tópicos de Pavimentos de Concreto*. Lima : s.n., 2012. 313 p.
5. CASTRO, Daniel, y otros. *Introducción a los SUDS. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible*. s.l. : Asociación Interciencia, Mayo de 2005. págs. 255-260.
6. CORONADO ITURBIDE, Jorge. *Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos*. Secretaría de integración económica centroamericana, 2002. 273 p.

7. Dirección General de Caminos. Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes. Septiembre de 2001. 724 p.
8. FLORES, Lesser; PUENTE, Rebeca; MAGAÑA, Raúl. Diseño de mezcla asfáltica semicaliente drenante en El Salvador. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Departamento de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador, 2010. 200 p.
9. Instituto Nacional de Vías. *Disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación, liga y curado, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas asfálticas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos*. Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. 2012. 40 p.
10. INV E-735-13. *Gravedad específica máxima de mezclas asfálticas para pavimentos*. Normas de ensayo de materiales para carreteras. 2012. 14 p.
11. INV E-736-13. *Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas*. Normas de ensayo de materiales para carreteras. 2012. 6 p.
12. INV E-748-13. *Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall*. Normas de ensayo de materiales para carreteras. 2012. 20 p.
13. INV E-760-13. *Caracterización de las mezclas asfálticas abiertas por medio del ensayo cantabro de pérdida por desgaste*. Normas de ensayo de materiales para carreteras. 2012. 6 p.

14. JUYAR MORA, Germán; PÉREZ CELY, Gabriel. *Comparación de Mezclas Asfálticas Drenantes fabricadas con asfalto modificado y sin modificar*. Revista Facultad de ingeniería, Universidad del Cauca. Julio 1998. pags 76-87.
15. LADINO, Ingrid; RAMÍREZ, Armando; ROSAS, Juan Pablo. *Diseño de mezcla asfáltica con asfalto caucho tecnología GAP Graded para la Ciudad de Bogotá*. Trabajo de graduación de ing. Civil. Facultad de ingeniería, Universidad Católica de Colombia, 2014. 91 p.
16. Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación. *Manual de Educación Ambiental del Recurso Hídrico En Guatemala*. 2016. 81 p.
17. TRUJILLO LÓPEZ, Alejandra y Quiroz Lasprilla, Diana Paola. *Pavimentos porosos utilizados como sistemas alternativos al drenaje urbano*. Bogotá, Colombia : s.n., 2013. 114 p.
18. Universidad Mayor de San Simón. Facultad de Ciencias y Tecnología. 2004. Libro de Pavimentos. 2004. 627 p.
19. Yepes Piqueras, Víctor. *Los ligantes hidrocarbonados*. Blog de Víctor Yepes. [En línea]. <<https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/betun-asfaltico/>>. Consulta: 9 de junio de 2020.

APÉNDICES

Apéndice 1. **Diámetros de especímenes ensayados**

Contenido de bitumen	A	B	C	D
	Ø (mm)	Ø (mm)	Ø (mm)	Ø (mm)
4,0 %	101,91	101,83	102,16	101,54
	101,66	101,52	102,00	102,49
	101,21	102,00	101,98	102,11
	101,84	101,71	101,98	102,24
4,5 %	102,14	102,01	102,67	101,69
	101,78	102,10	101,90	101,75
	101,76	101,94	102,27	101,85
	101,87	102,06	101,94	101,63
5,0 %	102,01	101,73	101,90	101,60
	101,75	101,89	102,12	101,40
	101,93	101,89	102,26	101,76
	101,74	101,83	101,94	101,55
5,5 %	101,71	101,69	101,68	101,50
	102,01	101,60	102,18	101,67
	101,66	101,69	101,73	102,57
	101,69	101,85	101,77	102,19
6,0 %	101,60	101,50	101,55	101,55
	101,43	101,25	101,23	101,46
	101,12	101,13	101,15	101,13
	101,46	101,46	101,48	101,48

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Alturas de especímenes ensayados**

Contenido de bitumen	A	B	C	D
	H (mm)	H (mm)	H (mm)	H (mm)
4,0 %	67,62	66,80	67,33	68,90
	66,50	67,39	67,31	67,70
	65,84	66,96	67,37	67,72
	66,60	66,54	67,70	69,39
4,5 %	65,23	65,01	70,68	65,35
	65,01	64,99	70,01	65,75
	64,69	64,59	70,24	65,23
	64,89	64,86	70,94	65,85
5,0 %	65,19	64,70	64,79	65,75
	64,24	64,90	64,63	65,82
	64,00	64,62	65,39	65,76
	64,15	64,54	65,73	65,81
5,5 %	65,02	65,35	62,05	63,87
	65,69	64,88	63,78	64,38
	66,88	65,41	63,49	63,97
	65,26	66,00	62,23	62,73
6,0 %	61,44	61,40	61,50	61,47
	62,19	62,00	62,15	61,55
	61,57	61,60	61,60	62,16
	61,28	61,30	61,27	61,50

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Volumen calculado de probetas

Contenido de Bitumen	1	2	3	4
	V (cm ³)	V (cm ³)	V (cm ³)	V (cm ³)
3,5 %	531,02	-	-	-
4,0 %	540,86	544,33	551,29	560,18
4,5 %	529,60	530,30	578,01	532,76
5,0 %	524,72	526,89	532,81	533,10
5,5 %	534,51	531,42	512,26	520,64
6,0 %	497,63	496,61	497,22	498,06

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Datos obtenidos del ensayo de gravedad específica máxima

	4,0 %	4,5 %	5,0 %	5,5 %	6,0 %
Picnómetro + agua (g)	7 378,90	7 378,90	7 374,10	7 374,10	7 374,10
Material + tara (g)	1 358,40	1 367,80	1 378,40	1 388,60	1 414,40
Tara (g)	2 59,00	257,00	257,00	258,00	259,00
Picnómetro + material + agua (g)	8 064,30	8 070,60	8 072,20	8 075,30	8 090,40
Material (g)	1 099,40	1 110,80	1 121,40	1 130,60	1 155,40
G _{mm}	2,66	2,65	2,65	2,63	2,63

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Hoja de resultados de análisis de asfalto modificado usado en el diseño de mezcla



PAVIMENTOS DE GUATEMALA, S.A.

53 Calle 22-08 zona 12, Guatemala
PBX: 502 24793021

RESULTADO DE ANALISIS DE LABORATORIO

Producto:	Asfalto Modificado
Especificación:	76-22
Fecha:	25-04-16
Hora:	8 am
Tanque:	3
Lote:	1,2,3

ANALISIS	RESULTADO	NORMA	RANGO
Gravedad Especifica, 60 °F	1.0581	ASTM D70	N.E.
Penetración, a 25° C,100g y 5 s	65.50	AASHTO T 49	Max, min 40-75
Penetración, a 4° C, 200g y 60 s	30	AASHTO T 49	Min 25
VISCOSIDAD, 135° c, centi Poises	1132	M-MMP-4-05-005/02	Max 2000
Punto de ablandamiento, R & B, ° C	60.0	AASHTO T 53	Min 60
Ensayos después de RTFOT			
Recuperación elástica, a 25 °C,%	50	M-MMP-4-05-024/02	Min 50
Penetración, a 4° C, 200g y 60 s	17	AASHTO T 49	Min 13

Observaciones: _____

F. _____

MSc. Ing. Q. Miguel Gallardo
Investigación y Desarrollo

Fuente: proporcionado por PADEGUA.

Anexo 2. **Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall, INV E—748-13**

Secciones 700 y 800 – MATERIALES Y MEZCLAS ASFÁLTICAS Y PROSPECCIÓN DE PAVIMENTOS

E - 748

ESTABILIDAD Y FLUJO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL EQUIPO MARSHALL

INV E – 748 – 13

1 OBJETO

- 1.1 Esta norma describe el procedimiento para determinar la resistencia a la deformación plástica de especímenes de mezclas asfálticas para pavimentación. Los especímenes, de forma cilíndrica y de 102 mm (4") de diámetro, son sometidos a carga en dirección perpendicular a su eje cilíndrico empleando el aparato Marshall. El procedimiento se puede emplear tanto para el proyecto de mezclas en el laboratorio como para el control en obra de las mismas. El método descrito en esta norma es aplicable solamente a mezclas elaboradas con cemento asfáltico y agregados pétreos con tamaño máximo menor o igual a 25.4 mm (1").
- 1.2 Esta norma reemplaza la norma INV E-748-07.

2 RESUMEN DEL MÉTODO

- 2.1 El procedimiento consiste en la fabricación de probetas cilíndricas de mezcla asfáltica, de 102 mm (4") de diámetro y una altura nominal de 63.5 mm (2½"), las cuales se someten a curado en un baño de agua o en un horno, y luego a carga en la prensa Marshall bajo condiciones normalizadas, determinándose su estabilidad y su deformación (flujo).
- 2.2 El ensayo Marshall se puede realizar con dos tipos de equipos: (1) el método tradicional, que emplea un marco de carga con un anillo de carga y un dial para medir la deformación (flujo) de las probetas (Método A), y (2) un registrador de carga-deformación combinado con una celda de carga y un transductor lineal diferencial variable (TLDV) u otro dispositivo de registro automático de la deformación (Método B).

3 IMPORTANCIA Y USO

- 3.1 Las probetas elaboradas de acuerdo con el procedimiento descrito en esta norma se utilizan tanto para determinar la estabilidad y el flujo, como para realizar análisis de densidad y de vacíos, los cuales se aplican tanto en el diseño de las mezclas asfálticas como en la evaluación de la compactación en

E 748 - 1

Continuación del anexo 2.

E - 748

Instituto Nacional de Vías
Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras

el campo. Así mismo, con estas probetas se pueden realizar otros ensayos físicos, como los de resistencia a la tensión indirecta (que se usa para determinar la susceptibilidad al agua de las mezclas compactadas), fatiga, *creep* y módulo resiliente.

Nota 1: Con las mezclas sin compactar se puede determinar la gravedad específica máxima (norma INV E-735).

- 3.2** Si la información obtenida mediante este ensayo se va a emplear en el diseño de la mezcla asfáltica, los resultados de estabilidad y flujo se deberán obtener a partir del promedio de los valores obtenidos con un mínimo de tres especímenes para cada contenido de ligante asfáltico. Salvo indicación en contrario, los incrementos en el contenido de ligante serán de 0.5 % con respecto a la masa de la mezcla, dentro de un rango elegido a partir de la experiencia y de los datos históricos disponibles sobre el diseño de mezclas con los mismos materiales. Por lo general, las mezclas densas en caliente muestran un pico de estabilidad dentro del rango de contenido de asfalto que se ensayen. Los valores de estabilidad, flujo, densidad, vacíos totales y con aire, y vacíos llenos con asfalto se representan gráficamente contra el contenido de ligante de los diferentes juegos de probetas, para determinar el contenido óptimo de asfalto de la mezcla (Ver Anexo A).
- 3.3** Los valores de estabilidad y flujo de especímenes obtenidos a partir de mezclas elaboradas en la planta pueden variar significativamente en relación con los valores de diseño de laboratorio, debido a las diferencias entre los mezclados en planta y en laboratorio, en especial en lo referente a la eficiencia del mezclado y al envejecimiento del asfalto.
- 3.4** Si se presentan diferencias significativas en la estabilidad y el flujo Marshall entre los resultados de juegos consecutivos de ensayos o con respecto a los valores promedio de los datos de probetas elaboradas con la mezcla producida en la planta, ellas se puede deber a un muestreo o a una técnica de ensayo incorrectos, a cambios en la gradación y/o en el contenido de ligante, o a deficiencias en el funcionamiento de la planta. Cuando esto suceda, se deberá detener la producción, encontrar la fuente de error y corregir el problema.
- 3.5** La estabilidad y el flujo Marshall se pueden determinar, también, sobre núcleos extraídos de capas de pavimento, con propósitos de información o de evaluación. Sin embargo, estos resultados no son necesariamente comparables con los obtenidos con las probetas elaboradas en el laboratorio y no se admite su empleo con fines de aceptación o de verificación del cumplimiento de las especificaciones. Una fuente frecuente de error en el ensayo de núcleos obtenidos de pavimentos se presenta cuando su contorno

Continuación del anexo 2.

no es completamente liso o perpendicular a las bases. Estas condiciones crean concentraciones de esfuerzos al aplicar la carga, las cuales se traducen en menores valores de estabilidad.

4 EQUIPO

- 4.1** *Dispositivo para moldear probetas* – Molde cilíndrico con un collar de extensión y una placa de base plana. Sus formas y dimensiones se muestran en la Figura 748 - 1.
- 4.2** *Extractor de probetas* – Elemento de acero en forma de disco, con diámetro de 100 mm (3.95") y 12.7 mm (½") de espesor, utilizado para extraer la probeta compactada del molde con la ayuda del collar de extensión. Se requiere un elemento adecuado para transferir la carga a la probeta (gato hidráulico o mecánico), sin deformarla durante el proceso de extracción.
- 4.3** *Martillos de compactación:*
- 4.3.1** *Martillos de compactación con mango sostenido manualmente (tipo 1) o fijo (tipo 2)* – De operación manual o mecánica. Consisten en dispositivos de acero con una base plana circular de compactación con una articulación de resorte y un pisón deslizante de 4.54 ± 0.01 kg (10 ± 0.02 lb) de masa total, montado en forma que proporcione una altura de caída de 457.2 ± 1.5 mm (18 ± 0.06 "). Su forma y dimensiones se presentan en la Figura 748 - 2. La Figura 748 - 3 muestra un martillo mecánico típico.

Nota 2: Los martillos de manejo manual deben estar equipados con un protector de dedos.

- 4.3.2** *Martillos de compactación de mango fijo (tipo 3)* – Operados mecánicamente, provistos de un contrapeso ubicado en la parte superior de la máquina que evita el efecto de rebote sobre la muestra y de una base con un dispositivo que le proporciona rotación continua. Su cara de compactación es circular e inclinada. El martillo tiene una masa total de 4.54 ± 0.01 kg (10 ± 0.02 lb) y una altura de caída libre de 457.2 ± 1.5 mm (18 ± 0.06 "). La rotación de la base y la frecuencia de golpeo del martillo deben ser de 18 a 30 rpm y 64 ± 4 golpes/minuto, respectivamente.

Nota 3: Los aparatos del tipo 3 se encuentran en versiones con más de un martillo (Figura 748 - 4). No es recomendable la operación de varios martillos simultáneamente, por cuanto se afecta la densidad del espécimen. Los mejores resultados comparativos se obtienen compactando todos los especímenes con el mismo martillo y sin que haya otros martillos operando.

Continuación del anexo 2.

E - 748

Instituto Nacional de Vías
Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras

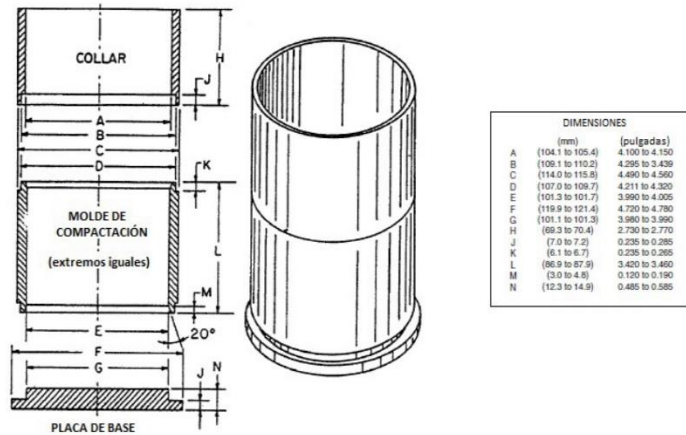


Figura 748 - 1. Molde para probetas Marshall

- 4.4 Pedestal de compactación** – Pieza prismática de madera de base cuadrada, de 203.2 mm de lado y 457.2 mm de altura (8" × 8" × 18"), provista en su cara superior con una platina cuadrada de acero de 304.8 mm de lado y 25.4 mm de espesor (12" × 12" × 1"), firmemente sujeta al pedestal. La madera será roble, pino amarillo u otra clase, con una densidad seca de 670 a 770 kg/m³ (42 a 48 lb/pie³). El conjunto se debe fijar firmemente a una base de concreto mediante soportes en escuadra (Ver Figura 748 - 3). El pedestal se debe instalar de manera que la pieza de madera quede a plomo y con la platina de acero en posición horizontal.
- 4.5 Sujetador para el molde** – Dispositivo con resorte de tensión, diseñado para centrar rígidamente el molde de compactación sobre el pedestal. En los equipos que tienen varios compactadores, los sujetadores no se encuentran necesariamente centrados. El sujetador debe sostener en su posición el molde, el collar y la placa de base durante la compactación de la probeta.
- 4.6 Elementos de calefacción** – Para calentar los agregados, el asfalto, los moldes, los martillos y otros elementos, se requiere un horno o una placa de calefacción provista de control termostático, capaz de mantener la temperatura en un rango de ± 3° C (± 5° F) en relación con las temperaturas requeridas para la mezcla y la compactación. Sobre la superficie de la placa de calefacción se debe colocar una placa desviadora o un baño de arena, con el fin de minimizar los sobrecalentamientos locales.

Continuación del anexo 2.

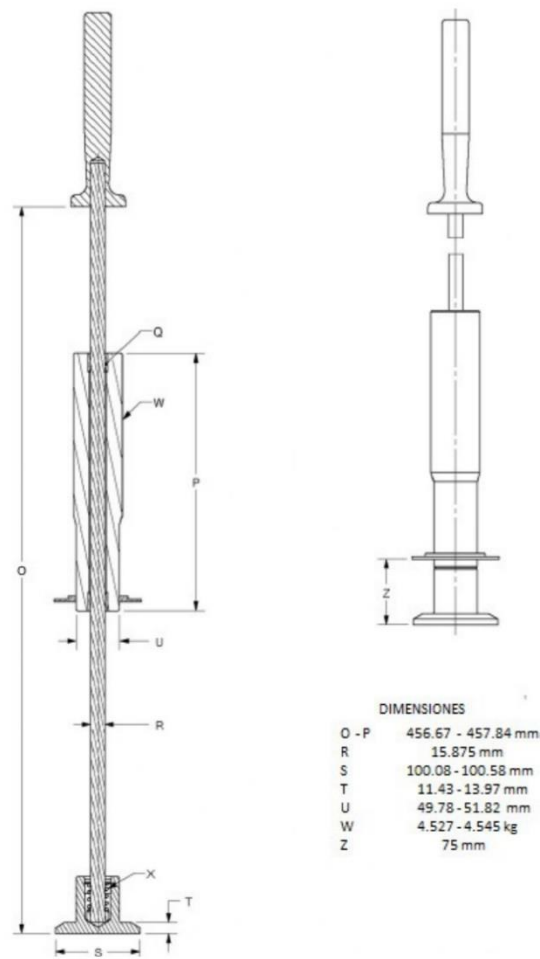


Figura 748 - 2. Martillo de compactación de manejo manual

- 4.7 *Mezcladora* – Se recomienda que la operación de mezclado de los materiales se realice con una mezcladora mecánica capaz de producir, en el menor tiempo posible, una mezcla homogénea a la temperatura requerida. Si la operación de mezclado se realiza a mano, este proceso se debe realizar en un

Continuación del anexo 2.

E - 748

Instituto Nacional de Vías
Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras

recipiente de suficiente capacidad y sobre una placa de calefacción, para evitar el enfriamiento de los materiales, tomando las precauciones indicadas en el numeral 4.6 para evitar los sobrecalentamientos locales.



Figura 748 - 3. Martillo mecánico de compactación Marshall

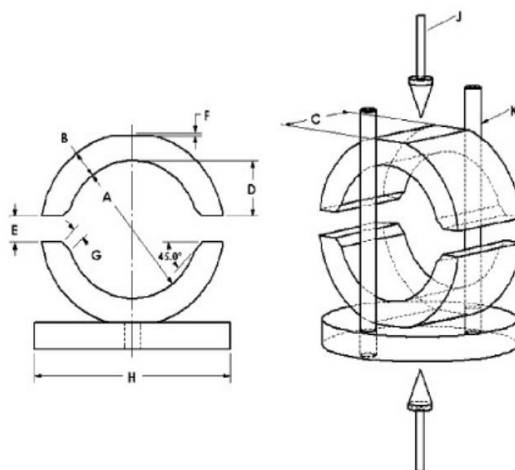


Figura 748 - 4. Compactador Marshall doble

- 4.8** *Mordazas (Figura 748 - 5)* – Consisten en dos segmentos cilíndricos de hierro fundido gris, acero fundido o de tubería de acero recocido. La mordaza inferior va montada sobre una base plana, provista de dos varillas perpendiculares a

Continuación del anexo 2.

ella (de 12.5 mm (½") de diámetro o más), que sirven de guía para ensamblarla con la mordaza superior, sin que queden muy apretadas o sueltas. El bisel de las mordazas debe ser el que muestra la Figura 748 - 5, para evitar resultados erróneos.



	mm	in.
A	101.5 to 101.7	3.995 to 4.005
B	21.7 min	0.855 min
C	76.2 min	3.0 min
D	41.15 to 41.40	1.620 to 1.630
E	18.92 to 19.18	0.745 to 0.755
F	2.0 ref	0.08 ref
G	8.89 to 9.09	0.350 to 0.358
H	101.3 min	3.990 min
J	Fuerzas transmitidas a través de una superficie esférica y una plana	
K	Sistema de guía (ni muy apretado ni muy suelto)	

Figura 748 - 5. Mordazas

- 4.9 Máquina de compresión** – Para la rotura de las probetas se empleará una prensa mecánica o hidráulica, capaz de producir una velocidad uniforme de desplazamiento vertical de 50 ± 5 mm/min. (2 ± 0.15 " /min.). En el diseño mostrado en la Figura 748 - 6, la potencia la suministra un motor eléctrico. Se permite el empleo de una máquina de operación mecánica o hidráulica que permita aplicar la carga a la velocidad recién indicada.
- 4.10 Medidor de la estabilidad** – La resistencia de la probeta en el ensayo se medirá con un anillo dinamométrico acoplado a la prensa (Figura 748 - 6), de 20 kN

Continuación del anexo 2.

E - 748

Instituto Nacional de Vías
Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras

(5000 lbf) de capacidad nominal, con una sensibilidad mínima de 50 N (10 lbf). Las deformaciones del anillo se miden con un dial graduado en 0.0025 mm (0.0001") o de mayor precisión. El anillo deberá estar unido al marco de carga y a un adaptador que permita transmitir la carga a las mordazas. En lugar del anillo dinamométrico se puede emplear una celda de carga conectada a un registrador de deformación o a un computador, siempre que la celda satisfaga los requisitos de capacidad y sensibilidad indicados.

Nota 4: Se pueden requerir anillos dinamométricos de mayor capacidad, para el ensayo de mezclas de alto módulo.

- 4.11 Medidor de deformación (flujo)** – El medidor de deformación consiste en un deformímetro de lectura fija, con divisiones en 0.25 mm (0.01") o de mayor precisión (Figura 748 - 7). En el momento del ensayo, el medidor deberá estar firmemente apoyado sobre la mordaza superior y su vástago se apoyará en una de las varillas guías acopladas a la mordaza inferior. Este medidor puede ser reemplazado por un transductor lineal diferencial variable (TLDV) conectado al sistema de registro de deformación o al computador (Figura 748 - 8), el cual deberá tener, al menos, la misma sensibilidad del deformímetro. El transductor debe estar diseñado para medir y registrar el mismo movimiento relativo entre la parte superior de la varilla guía y la mordaza superior.

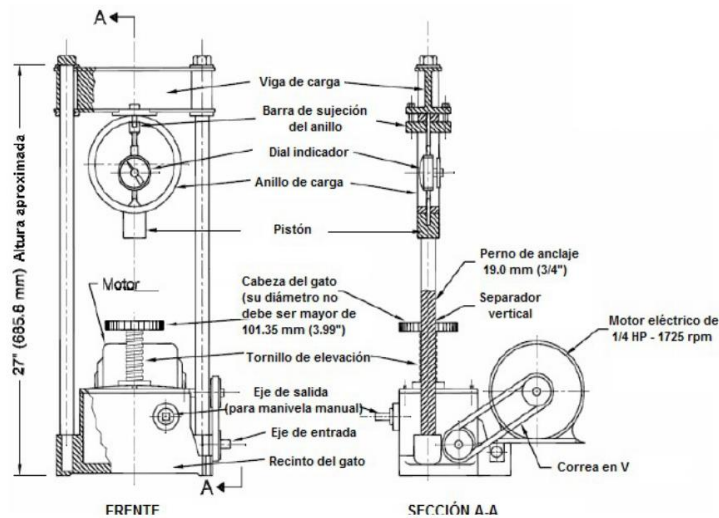


Figura 748 - 6. Máquina de compresión

E 748 - 8

Continuación del anexo 2.



Figura 748 - 7. Deformímetro para medir el flujo

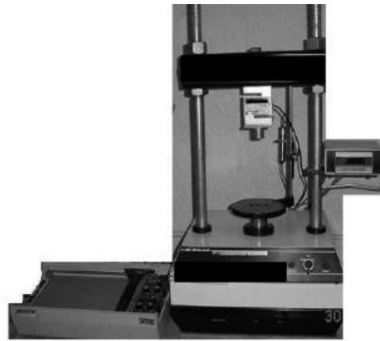


Figura 748 - 8. Máquina de compresión con TDLV y graficador

4.12 Baño de agua – De la profundidad suficiente para mantener una lámina de agua mínima de 30 mm (1.25") sobre la superficie superior de las probetas compactadas. Debe tener un control termostático que le permita mantener en cualquier punto del tanque la temperatura especificada $\pm 1^\circ \text{C}$ ($\pm 2.0^\circ \text{F}$). El baño deberá tener un falso fondo perforado o estar equipado con un estante para sostener las probetas 50 mm (2") o más por encima fondo del tanque. También, deberá estar equipado con un dispositivo mecánico para la circulación del agua.

4.13 Equipo misceláneo:

4.13.1 Bandejas metálicas – De fondo plano, para calentar agregados.

Continuación del anexo 2.

E - 748

Instituto Nacional de Vías
Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras

- 4.13.2** *Recipientes con tapa* – Para calentar el cemento asfáltico.
- 4.13.3** *Herramientas para mezclar* – Palustres de acero de punta redondeada, cucharones, espátulas.
- 4.13.4** *Termómetros blindados* – Con rango de 10 a 200° C (50 a 400° F) y sensibilidad de 3° C (5° F), para determinar las temperaturas del asfalto, los agregados y la mezcla. Para medir la temperatura del baño de agua, se utilizará un termómetro con escala de 20 a 70° C, con posibilidad de lectura de 0.2° C (0.4° F).
- 4.13.5** *Balanza* – De 2 kg de capacidad, legible a 0.1 g, para pesar los materiales y las probetas compactadas.
- 4.13.6** *Tamices* – Los necesarios para reproducir en el laboratorio la granulometría exigida por la especificación a los agregados empleados para la mezcla que se va a diseñar.
- 4.13.7** *Guantes* – De soldador para manejar equipo caliente, y de caucho para sacar las muestras del baño de agua.
- 4.13.8** *Crayolas* – Para identificar las probetas.

5 ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS

- 5.1** *Número de probetas* – Para una gradación particular del agregado, original o mezclada, se deberá preparar una serie de probetas con diferentes contenidos de asfalto (con incrementos de 0.5 % en masa entre ellos), de manera que los resultados se puedan graficar en curvas que indiquen un contenido "óptimo" definido, con puntos de cada lado de este valor. Como mínimo, se prepararán tres probetas para cada contenido de asfalto.
- 5.2** *Cantidad de materiales* – Un diseño con seis contenidos de asfalto, necesitará, entonces, por lo menos dieciocho (18) probetas. Para cada probeta se necesitan unos 1200 g de ingredientes; por lo tanto, para una serie de muestras de una gradación dada resulta conveniente disponer de unos 23 kg (50 lb) de agregados y alrededor de 4 litros (1 galón) de cemento asfáltico. Se requiere, además, una cantidad extra de materiales para análisis granulométricos y para la determinación de sus gravedades específicas.

Continuación del anexo 2.

- 5.3 Preparación de los agregados** – Los agregados se deberán secar hasta masa constante a una temperatura entre 105 y 110° C (220 y 230° F) y se separarán por tamizado en fracciones de diferentes tamaños. En general, se recomiendan las porciones que se indican a continuación:

25.0 mm a 19.0 mm	(1" a ¾")
19.0 mm a 9.50 mm	(¾" a 3/8")
9.50 mm a 4.75 mm	(3/8" a No. 4)
4.75 mm a 2.36 mm	(No. 4 a No. 8)
Pasante de 2.36 mm	(No. 8)

- 5.4 Determinación de las temperaturas de mezcla y compactación** – La temperatura a la cual se debe calentar el cemento asfáltico para elaborar las mezclas será la requerida para que presente una viscosidad de 170 ± 20 cP (0.17 ± 0.02 Pa.s). La temperatura a la cual se deberá realizar la compactación de las probetas será la correspondiente a una viscosidad del cemento asfáltico de 280 ± 30 cP (0.28 ± 0.03 Pa.s). Un ejemplo de gráfica viscosidad – temperatura se muestra en la Figura 753 - 1 de la norma INV E-753.

Nota 5: La selección de las temperaturas de mezcla y compactación a las viscosidades mencionadas en el numeral 5.4 puede resultar inaplicable en el caso de los asfaltos modificados. El usuario deberá contactar al fabricante para establecer los rangos convenientes de temperatura de dichos productos.

Nota 6: Si se van a recompactar mezclas recuperadas de pavimentos, ellas se deberán calentar dentro de un horno, en recipientes cubiertos, a una temperatura de $\pm 3^\circ$ C (5° F) la deseada para la compactación. El calentamiento deberá ser solamente el suficiente para alcanzar dicha temperatura. Si no se conoce la temperatura de compactación para una mezcla específica, la experiencia ha demostrado que estas mezclas se deben compactar a una temperatura entre 120 y 135° C (250 y 275° F). Al preparar la mezcla, ella se deberá calentar primero de manera suave para ponerla en condición suelta y, simultáneamente, se deberán remover todas las partículas de agregado que se encuentren partidas. Es de esperar que la estabilidad de las mezclas recalentadas, tomadas de pavimentos existentes, sea mayor que la de la mezcla original, debido al endurecimiento que ha sufrido el ligante. El calentamiento en el laboratorio de la mezcla recuperada del pavimento, afecta de manera mínima el endurecimiento del ligante.

- 5.5 Preparación de las mezclas** – Las mezclas se pueden preparar en las cantidades necesarias para elaborar una probeta o el juego de tres probetas requerido por cada porcentaje de ligante.

5.5.1 En varias bandejas taradas, separadas para cada fracción de la muestra, se pesan sucesivamente las cantidades de cada porción de agregados, previamente calculadas de acuerdo con la gradación necesaria para la fabricación de una o más probetas, de forma que cada probeta resulte con una altura de 63.5 ± 2.5 mm ($2 \frac{1}{2} \pm 0.1$ ") (aproximadamente 1200, 2400 o 3600 g para 1, 2 o 3 probetas). Los agregados se calientan en una placa de calentamiento o en el horno a una temperatura mayor que la establecida para la mezcla, pero sin

Continuación del anexo 2.

E - 748

Instituto Nacional de Vías
Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras

excederla en más de 28° C (50° F). Posteriormente, se transfieren al recipiente de mezclado donde se mezclan en seco durante unos 5 s y, a continuación, se forma un cráter en su centro, dentro del cual se vierte la cantidad requerida de asfalto, debiendo estar ambos materiales en ese instante a temperaturas comprendidas dentro de los límites establecidos para el proceso de mezcla según lo indicado en el numeral 5.4. A continuación, se mezclan los agregados y el asfalto lo más rápidamente posible hasta obtener una mezcla completa y homogénea en un término no mayor de 60 s si la cantidad de mezcla es la necesaria para elaborar una sola probeta o de 120 s si la bachada es múltiple. Se deben evitar pérdidas de material durante el mezclado y el manejo posterior (Figura 748 - 9).



Figura 748 - 9. Adición del asfalto a los agregados y mezcla manual sobre una placa calefactora

- 5.5.2** Las bachadas sencillas (para una sola probeta) se colocan en un horno ventilado, dentro de recipientes metálicos cerrados, a una temperatura de 8 a 11° C (15 a 20° F) por encima de la establecida para la compactación (Ver numeral 5.4), durante un período comprendido entre 1 y 2 horas.
- 5.5.3** En el caso de bachadas múltiples, ellas se colocan sobre una superficie limpia y no absorbente. Se hace una mezcla manual y se cuartea para producir las porciones para confeccionar cada una de las probetas, colocando cada una en un recipiente y procediendo luego como se indica en el numeral 5.5.2.

Nota 7: El calentamiento de las mezclas antes de la compactación puede dar lugar a especímenes con propiedades diferentes a las que presentan aquellos que se compactan inmediatamente después de la operación de mezclado (el procedimiento Marshall original no incluía el período de curado)

5.6 Compactación de las Probetas:

E 748 - 12

Continuación del anexo 2.

- 5.6.1** Simultáneamente con la preparación de la mezcla, el conjunto de molde, collar, placa de base y la base del martillo de compactación, se limpian y calientan en un baño de agua hirviendo o en el horno o una placa calefactora, a una temperatura comprendida entre 90 y 150° C (200 y 300° F). Se arma el conjunto de moldeo de las probetas y, antes de verter la mezcla, se coloca en el fondo del molde un papel de filtro circular de tamaño ajustado al área interna del molde. A continuación, se coloca toda la porción de mezcla en el molde y se la golpea vigorosamente con una espátula o palustre caliente, 15 veces alrededor del perímetro y 10 sobre el interior (Figura 748 - 10). Se coloca otro papel de filtro sobre la mezcla. La temperatura de la mezcla inmediatamente antes de la compactación deberá hallarse dentro de los límites de temperatura de compactación establecidos en el numeral 5.4.



Figura 748 - 10. Golpes con la espátula a la mezcla dentro del molde

- 5.6.2** Se coloca el conjunto en el sujetador sobre el pedestal de compactación y se aplica el número de golpes especificado, empleando para ello el martillo de compactación. En seguida, se retiran la placa de base y el collar y se colocan en los extremos opuestos del molde; se vuelve a montar éste en el pedestal y se aplica el mismo número de golpes a la cara invertida de la muestra. Después de la compactación, se retiran el collar y la placa de base, y se deja enfriar la muestra al aire hasta que su temperatura sea tal, que no se produzca ningún daño en ella al extraerla del molde. Se pueden utilizar ventiladores de mesa cuando se desee un enfriamiento más rápido, o se puede sumergir el molde en agua fría dentro de una bolsa plástica. Se saca cuidadosamente la probeta del molde con ayuda del extractor (Figura

Continuación del anexo 2.

E - 748

Instituto Nacional de Vías
Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras

748 - 11), se identifica con la crayola y se coloca sobre una superficie plana, lisa, donde se deja en reposo durante una noche.

Nota 8: En el momento de utilización, el martillo se debe encontrar limpio y levemente aceitado.

Nota 9: Para facilitar la extracción, el molde con la probeta se puede sumergir brevemente en un baño de agua caliente con el fin de calentar el metal del molde y reducir la distorsión de la muestra.



Figura 748 - 11. Extracción de la probeta

5.6.2.1 Cuando la compactación se realiza manualmente, es necesario que el operador sostenga el martillo verticalmente sobre la muestra, para evitar el rozamiento entre la masa de compactación y la guía del martillo. Cuando se desarrolló el procedimiento Marshall original, no se contempló el uso de equipos mecánicos que impiden el movimiento lateral del martillo durante la compactación.

5.6.3 Cumplido el período de reposo, se determina la gravedad específica bulk de cada probeta mediante alguno de los procedimientos descritos en las normas INV E-733, INV E-734 o INV E-802. Los valores de las gravedades específicas de probetas elaboradas con los mismos ingredientes y en las mismas condiciones se deberán encontrar en un rango de ± 0.020 en relación con su valor promedio. Posteriormente, se mide el espesor de cada espécimen según el procedimiento de la norma INV E-744.

6 ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO

6.1 El ensayo de estabilidad y flujo se deberá realizar dentro de las 24 horas siguientes a la compactación de las probetas. Se colocan las probetas en un

E 748 - 14

Fuente: Instituto Nacional de Vías de Colombia. *Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall (INV E-748-13)*. Edición 2012. p. 1-14.

