



LINCENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL

Tesis de grado

Análisis del uso de bolsas plásticas recicladas tipo PE de baja densidad,
empleadas para la protección del banano como aditivo para la durabilidad de
mezclas asfálticas densas

Keylor Andrés Saborío Vargas

Heredia, diciembre de 2016



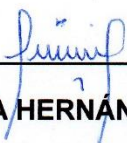
TRIBUNAL EXAMINADOR

Este proyecto titulado: ANÁLISIS DEL USO DE BOLSAS PLÁSTICAS RECICLADAS TIPO PE DE BAJA DENSIDAD, EMPLEADAS PARA LA PROTECCIÓN DEL BANANO, COMO ADITIVO PARA LA DURABILIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DENSAS, por el estudiante: Keylor Andrés Saborio Vargas, fue aprobada por el Tribunal Examinador de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad Latina, Sede Heredia, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil:



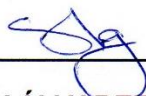
ING. CARLOS ALBERTO SOLÍS MOLINA

TUTOR



ING. JESSICA HERNÁNDEZ DELGADO

LECTOR



ING. SIRLEY ÁLVAREZ GONZÁLEZ

REPRESENTANTE DE RECTORÍA

COMITÉ ASESOR

ING. CARLOS ALBERTO SOLÍS MOLINA

TUTOR

ING. JESSICA HERNÁNDEZ DELGADO

LECTOR

ING. SIRLEY ÁLVAREZ GONZÁLEZ

REPRESENTANTE DE RECTORÍA



**CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL PROFESOR TUTOR DEL
TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN MODALIDAD TESIS DE GRADO**

Heredia, 12 de enero, de 2017

Sres.
Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación
SD

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, modalidad Tesis de Grado bajo el título "Análisis del uso de bolsas plásticas recicladas tipo PE de baja densidad, empleadas para la protección del banano, como aditivo para la durabilidad de mezclas asfálticas densas" por parte del estudiante: Keylor Andrés Saborío Vargas, como requisito para que el citado estudiante puedan optar por la Licenciatura en Ingeniería Civil.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su defensa oral ante el Consejo Asesor.

Suscribe cordialmente,

Ing. Carlos Solís Molina



**CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL PROFESOR LECTOR DEL
TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN MODALIDAD TESIS DE GRADO**

Heredia, 12 de enero, de 2017

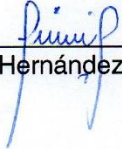
Sres.
Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación
SD

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, modalidad Tesis de Grado bajo el título "Análisis del uso de bolsas plásticas recicladas tipo PE de baja densidad, empleadas para la protección del banano, como aditivo para la durabilidad de mezclas asfálticas densas" por parte del estudiante: Keylor Andrés Saborío Vargas, como requisito para que el citado estudiante puedan optar por la Licenciatura en Ingeniería Civil.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su defensa oral ante el Consejo Asesor.

Suscribe cordialmente,



Ing. Jessica Hernández Delgado

San José, 27 de enero de 2017

Universidad Latina de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Civil

Estimados(as) señores(as):

Por medio de la presente hago constar que yo, Karol Tatiana Barrantes Centeno, cédula 113290984, filóloga española, miembro activo de COLYPRO bajo el número de carné 67890, doy fe de haber corregido exhaustivamente el Trabajo Final de Graduación, para optar por el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Civil, denominado “Análisis del uso de bolsas plásticas recicladas tipo PE de baja densidad, empleadas para la protección del banano como aditivo para la durabilidad de mezclas asfálticas densas”, el cual estuvo a cargo del estudiante **Keylor Andrés Saborío Vargas**. Dicha corrección se realizó en relación con los siguientes aspectos:

1. Lexicografía, morfología, fondo y forma en su totalidad.
2. Uso correcto de las preposiciones.
3. Usos lingüísticos de los signos de puntuación, interrogación y exclamación.
4. Solecismos, barbarismos, cacofonías, anfibologías, monotonía del lenguaje, redundancia, pleonasmos y ortografía.

Por tanto, doy fe que este proyecto contiene un fondo claro y preciso de la propuesta expresada en el mismo, con ideas correctas, que mantienen el hilo conductor a lo largo del documento.

Atentamente,



Karol Tatiana Barrantes Centeno
Filóloga española
COLYPRO 67890



“Carta Autorización del autor(es) para uso didáctico del Trabajo Final de Graduación”

Vigente a partir del 31 de Mayo de 2016

Instrucción: Complete el formulario en PDF, imprímalo, firme, escanee y adjunte en la página correspondiente del Trabajo Final de Graduación.

Yo (Nosotros):

Escriba Apellidos, Nombre del Autor(a). Para más de un autor separe con " ; "

Saborío Vargas, Keylor Andrés.

De la Carrera / Programa: Licenciatura en Ingeniería Civil
autor (es) del (de la) *(Indique tipo de trabajo):* Tesis de grado
titulado:

Análisis del uso de bolsas plásticas recicladas tipo PE de baja densidad, empleadas para la protección del banano como aditivo para la durabilidad de mezclas asfálticas densas

Autorizo (autorizamos) a la Universidad Latina de Costa Rica, para que exponga mi trabajo como medio didáctico en el Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación (CRAI o Biblioteca), y con fines académicos permita a los usuarios su consulta y acceso mediante catálogos electrónicos, repositorios académicos nacionales o internacionales, página web institucional, así como medios electrónicos en general, internet, intranet, DVD, u otro formato conocido o por conocer; así como integrados en programas de cooperación bibliotecaria académicos dentro o fuera de la Red Laureate, que permitan mostrar al mundo la producción académica de la Universidad a través de la visibilidad de su contenido.

De acuerdo con lo dispuesto en la Ley No. 6683 sobre derechos de autor y derechos conexos de Costa Rica, permita copiar, reproducir o transferir información del documento, conforme su uso educativo y debiendo citar en todo momento la fuente de información; únicamente podrá ser consultado, esto permitirá ampliar los conocimientos a las personas que hagan uso, siempre y cuando resguarden la completa información que allí se muestra, debiendo citar los datos bibliográficos de la obra en caso de usar información textual o paráfrasis de esta.

La presente autorización se extiende el día *(Día, fecha)* viernes 13 del mes enero del año 2017 a las 1:00 pm. Asimismo declaro bajo fe de juramento, conociendo las consecuencias penales que conlleva el delito de perjurio: que soy el autor(a) del presente trabajo final de graduación, que el contenido de dicho trabajo es obra original del (la) suscrito(a) y de la veracidad de los datos incluidos en el documento. Eximo a la Universidad Latina; así como al Tutor y Lector que han revisado el presente, por las manifestaciones y/o apreciaciones personales incluidas en el mismo, de cualquier responsabilidad por su autoría o cualquier situación de perjuicio que se pudiera presentar.

Firma(s) de los autores *Según orden de mención al inicio de ésta carta:*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mis padres, Andrés Saborío y Xinia Vargas por todo el apoyo, la confianza y amor que me mostraron durante esta etapa; además a mis amigos, en especial a Alonso Alvarado, José Corrales y Valery Fallas que me acompañaron durante este largo y provechoso recorrido, donde crecimos como personas y profesionales.

También agradezco a todos aquellos que de una u otra manera me ayudaron a llegar a la meta, pero sobre todo le agradezco a Dios, porque sin él nada de esto sería posible.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres Andrés Saborío y Xinia Vargas, como símbolo de agradecimiento por impulsarme y apoyarme en los buenos y malos momentos

RESUMEN

La investigación consiste en una comparación de dos mezclas asfálticas con igual agregado pétreo y granulometría, la diferencia radica en que un diseño de mezcla contiene cemento asfáltico y la otra la combinación de cemento asfáltico con plástico reciclado tipo polietileno de baja densidad, en una proporción del 3% de la masa del cemento asfáltico.

Se evalúa el efecto en la durabilidad de la mezcla que produce el plástico, midiendo valores de vacío, la cantidad de asfalto y la susceptibilidad al agua, esto por medio de pruebas de laboratorio normadas por la AASHTO. Además, se puede encontrar fundamentación teórica, la cual permite comprender los resultados de los ensayos.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	iii
DEDICATORIA	iv
RESUMEN.....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
1. CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	10
1.1 Antecedentes.....	10
1.2 Justificación	11
1.3 Formulación del problema	13
1.4 Objetivos	13
1.4.1 Objetivo general.....	13
1.4.2 Objetivos específicos	13
1.5 Alcances y limitaciones.....	14
1.5.1 Alcances.....	14
1.5.2 Limitaciones.....	14
2. CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL	16
2.1 Materiales.....	16
2.1.1 Agregados.....	16
2.1.2 Asfalto	18
2.2 Mezcla asfáltica.....	21
2.2.1 Clasificación de las mezclas asfálticas	23
2.3 Asfalto modificado con polímero	24
2.3.1 Tipos de polímeros	25

2.4	Características y propiedades de la mezcla asfáltica	26
2.4.1	Características	26
2.4.2	Propiedades.....	29
2.5	Método Marshall de diseño de mezclas asfálticas	30
2.5.1	Procedimientos generales	31
2.6	Procedimiento para determinar la resistencia a la tensión diametral retenida 33	
2.7	Procedimiento para determinar la resistencia retenida a la compresión uniaxial.....	34
2.8	Bolsa plástica reciclada tipo PE de baja densidad para protección del fruto de banano	34
3.	CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO	36
3.1	Definición del enfoque y método de investigación	36
3.2	Sujetos y fuentes de información	36
3.3	Definición de variables	37
3.4	Instrumentos empleados en la recolección de datos.....	38
3.5	Muestras y técnicas de muestreo	39
3.6	Procesamiento y análisis de datos	39
4.	CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE RESULTADOS	44
4.1	Granulometría de diseño	44
4.2	Gravedad específica de los agregados de diseño	46
4.2.1	Gravedad específica bruta del agregado grueso	46
4.2.2	Gravedad específica bruta del agregado fino	46
4.2.3	Gravedad específica bruta ponderada	46
4.3	Gravedades específicas máximas teóricas	46

4.3.1 Gravedades específicas máximas teóricas para mezcla asfáltica convencional	47
4.3.2 Gravedades específicas máximas teóricas para mezcla asfáltica con inclusión de bolsa plástica reciclada tipo PE de baja densidad	48
4.4 Diseño de mezcla asfáltica por el método Marshall AASHTO T 245	50
4.4.1 Diseño de mezcla asfáltica convencional	50
4.4.2 Diseño de mezcla asfáltica con inclusión de plástico tipo PE de baja densidad	56
4.5 Resistencia la tensión diametral retenida al daño inducido por la humedad AASHTO T 283.	62
4.5.1 Resultados de tensión diametral para el diseño de mezcla convencional	62
4.5.2 Resultados de tensión diametral para el diseño de mezcla con inclusión de plástico tipo PE de baja densidad	64
4.6 Resistencia retenida a la compresión uniaxial, AASHTO 165 y AASHTO 167	67
4.6.1 Resultados de resistencia retenida para el diseño de mezcla convencional	67
4.6.2 Resultados de resistencia retenida para el diseño de mezcla con inclusión de plástico tipo PE de baja densidad	68
5. CONCLUSIONES.....	71
6. RECOMENDACIONES.....	77
Referencias bibliográficas.....	78
ANEXOS.....	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1, Requisitos para cemento asfáltico graduado por viscosidad (AASHTO M 226). Fuente: Asphalt Institute	20
Tabla 2, Granulometrías especificadas en el CR-2010 para mezclas asfálticas. Fuente: CR-2010	22
Tabla 3. Resumen de actividades, herramientas, métodos de ensayo y resultados esperados en función de cada objetivo. fuente propia	39
Tabla 4. Granulometría de diseño, con las tolerancias que especifica el manual CR-2010.	44
Tabla 5. Gravedades específicas máximas teóricas de la mezcla asfáltica convencional. Fuente: Informe INF. 2861-2016 CACISA	47
Tabla 6. Gravedades específicas máximas teóricas de la mezcla con inclusión de plástico.....	48
Tabla 7. Diseño de mezcla convencional, Propiedades Marshall. Fuente: Informe INF. 2861-2016 CACISA	51
Tabla 8. Tabla resumen de propiedades Marshall para la mezcla convencional. Fuente: Informe INF. 2861-2016 CACISA.....	52
Tabla 9. Diseño de mezcla asfáltica con inclusión de plástico, propiedades Marshall.	56
Tabla 10. Tabla resumen de propiedades Marshall para la mezcla con plástico incluido.....	57
Tabla 11. Datos generales de los especímenes de ensayo para la prueba de tensión diametral de la mezcla de diseño convencional. Fuente: Informe INF. 2861-2016 CACISA.....	62
Tabla 12. Porcentaje de saturación de los especímenes del ensayo de tensión diametral para el diseño de mezcla convencional. Fuente: Informe INF. 2861-2016 CACISA	63
Tabla 13. Resultados de tensión diametral para los especímenes en condición saturada del diseño de mezcla convencional. Fuente: Informe INF. 2861-2016 CACISA.....	63

Tabla 14. Resultados de tensión diametral para los especímenes en condición seca del diseño de mezcla convencional. Fuente: Informe INF. 2861-2016 CACISA.....	64
Tabla 15. Datos generales de los especímenes de ensayo para la prueba de tensión diametral de la mezcla de diseño con inclusión de plástico tipo Pe de baja densidad.	64
Tabla 16. Porcentaje de saturación de los especímenes del ensayo de tensión diametral para el diseño de mezcla con inclusión de plástico tipo PE de baja densidad.....	65
Tabla 17. Resultados de tensión diametral para los especímenes en condición saturada del diseño de mezcla con inclusión de plástico tipo PE de baja densidad..	65
Tabla 18. Resultados de tensión diametral para los especímenes en condición seca del diseño de mezcla con inclusión de plástico tipo PE de baja densidad.	66
Tabla 19. Datos generales de los especímenes de ensayo para la prueba de resistencia retenida de la mezcla de diseño convencional. Fuente: Informe INF. 2861-2016 CACISA	67
Tabla 20. Resultados de resistencia retenida para los especímenes en condición saturada del diseño de mezcla convencional. Fuente: Informe INF. 2861-2016 CACISA.	67
Tabla 21. Resultados de resistencia retenida para los especímenes en condición seca del diseño de mezcla convencional. Fuente: Informe INF. 2861-2016 CACISA.....	68
Tabla 22. Datos generales de los especímenes de ensayo para la prueba de resistencia retenida de la mezcla de diseño con inclusión de bolsa tipo PE de baja densidad.....	68
Tabla 23. Resultados de resistencia retenida para los especímenes en condición saturada del diseño de mezcla con inclusión de plástico tipo PE de baja densidad. Fuente propia.....	69

Tabla 24. Resultados de resistencia retenida para los especímenes en condición seca del diseño de mezcla con inclusión de plástico tipo PE de baja densidad. Fuente propia.	69
Tabla 25. Diseño y características de las mezclas asfálticas. Fuente Propia.....	71
Tabla 26. Tabla resumen de los valores de tensión diametral para los diseños de mezclas.	72
Tabla 27. Tabla resumen de los valores de resistencia retenida a compresión uniaxial.	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Productos y temperaturas típicas de destilación. Fuente: Asphalt Institute	19
Figura 2. Análisis de tamices. Fuente: Asphalt Institute	22
Figura 3. Ilustración del VMA en una probeta de mezcla compactada. Fuente: Asphalt Institute	28
Figura 4. Granulometría de diseño.....	45
Figura 5. Tendencia de la gravedad específica máxima teórica para mezcla asfáltica convencional. Fuente: Informe INF. 2861-2016 CACISA	48
Figura 6. Gravedad específica máxima teórica en relación del contenido de asfalto para la mezcla con inclusión de plástico tipo PE de baja densidad.	50
Figura 7. Relación del contenido de asfalto con la densidad de la mezcla asfáltica convencional. Fuente: Informe INF. 2861-2016 CACISA	52
Figura 8. Relación del contenido de asfalto con el contenido de vacíos de la mezcla asfáltica convencional. Fuente: Informe INF. 2861-2016 CACISA.....	53
Figura 9. Relación del contenido de asfalto con la estabilidad de la mezcla asfáltica convencional. Fuente: Informe INF. 2861-2016 CACISA	53
Figura 10. Relación del contenido de asfalto con el flujo del diseño de mezcla convencional. Fuente: Informe INF. 2861-2016 CACISA.....	54
Figura 11. Relación del contenido de asfalto con los vacíos de agregado mineral de la mezcla asfáltica convencional. Fuente: Informe INF. 2861-2016 CACISA.....	54
Figura 12. Relación del contenido de asfalto con los vacíos llenos de asfalto de la mezcla asfáltica convencional. Fuente: Informe INF. 2861-2016 CACISA.....	55
Figura 13. Relación del contenido de asfalto con la densidad de la mezcla asfáltica con inclusión de plástico.....	58

Figura 14. Relación del contenido de asfalto con el contenido de vacíos de la mezcla asfáltica con inclusión de plástico.	58
Figura 15. Relación del contenido de asfalto con la estabilidad de la mezcla asfáltica con inclusión de plástico.	59
Figura 16. Relación del contenido de asfalto con el flujo de la mezcla asfáltica con inclusión de plástico.	59
Figura 17. Relación del contenido de asfalto con los vacíos del agregado mineral de la mezcla asfáltica con inclusión de plástico.	60
Figura 18. Relación del contenido de asfalto con los vacíos llenos de asfalto de la mezcla asfáltica con inclusión de plástico.	60

1. CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Para comprender el actual problema que pretende abarcar la investigación, hay que retroceder hasta la etapa del neolítico donde “Durante estos miles de años surgen la agricultura y la ganadería, y también las artesanías, como las del tejido y el barro cocido.” (Claudio, Historia y biografías, s.f., párr. 1), es en esta época donde principalmente el ser humano hace sus primeras plantaciones masivas debido al sedentarismo, además se empiezan a domesticar los primeros animales, dando inicio a los primeros medios de transporte como los caballos y burros.

Conforme iban pasando miles de años, los métodos de plantación y desplazamiento evolucionaban, más aún con el descubrimiento de la rueda, que data alrededor de los años 2000 a.C; esta permitió las primeras carretas de uno o dos ejes tirados por bueyes o caballos (Claudio, Historia y Biografías, s.f., párr. 3).

Debido a que los usos de caminos se crearon con el fin de transportar mercancía o movilizarse, es que se empezaron a implementar las primeras capas de rodadura, en específico la piedra, que permitía un desplazamiento sobre una superficie firme, “Se estima que fue en el 3000 a.C que el imperio Hilita (en la península de Anatonía) construyó los primeros caminos a suelo firme” (Arkiplus, 2013, párr. 1), en el caso de Costa Rica, uno de los primeros caminos o calzadas de suelo firme que se tiene registro se encuentra en las faldas del volcán Turrialba, en el Monumento Nacional Guayabo, que posee una calzada de varios kilómetros de longitud.

La evolución de los métodos de transporte se ve reflejada en los vehículos con motor, como los automóviles, camiones pesados y livianos, los cuales a medida que evolucionan requieren de mejores capas de rodadura, con mejor capacidad de drenaje y con mayor durabilidad, es por esto que “La construcción del primer pavimento, tipo Sheet Asphalt, ocurre en 1876 en Washington D.C., con asfalto natural importado” (E-ASFALTO, s.f., párr. 9) pero no es hasta “ 1900 que aparece la primera mezcla asfáltica en caliente, utilizada

en la rue du Louvre y en la Avenue Victoria en París, la cual fue confeccionada con asfalto natural de la Isla de Trinidad.” (E-ASFALTO, s.f., párr. 9), desde ese entonces hasta la fecha, la mezcla asfáltica se ha ido mejorando y modificando para que sea más duradera y resistente.

Al igual que evolucionaban los medios de transportes y las vías, las plantaciones y la producción de alimentos crecían, se empiezan a crear plantaciones masivas, por ejemplo, el banano que “La producción y exportación de banano en Costa Rica comenzó hace más de 130 años, esta fruta la trajo al país Fray Tomás de Berlanga desde las islas Caimán” (Corbana, 2013, párr. 1)

Para mejorar la producción de banano, se empezó a utilizar una bolsa plástica tipo polietileno de baja densidad impregnada de un químico repelente de insectos que garantice el buen crecimiento de la fruta (Torres, Bernal & Castano, 2013, pág. 91), a la vez, que genere un problema de contaminación ambiental, debido a que “se calcula que por cada hectárea de plantación se produce aproximadamente 1,5 toneladas de este material no biodegradable” (Aguiar & Villegas, 2012, pág. 2).

Las mezclas asfálticas actualmente se pueden modificar con polímeros, los más comunes son los del tipo elastómeros; en Costa Rica el principal investigador es el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, conocido por sus siglas como el LANAMME, el cual ha realizado análisis del comportamiento reológico del asfalto con la incorporación de plástico de desecho de la industria bananera, en donde “El material de bolsa de banano se incorporó al asfalto en una proporción 3% por peso de mezcla (asfalto+modificante)” (Aguiar & Villegas, 2012, pág. 2).

1.2 Justificación

Actualmente en Costa Rica uno de los problemas que mayormente aqueja la población es el estado de las carreteras, y es que de acuerdo con un

estudio del periódico La Nación, en el país se utiliza un asfalto que no es el adecuado para carga vehicular y temperatura (Herrera, 2013, párr. 1), hasta la fecha se sigue utilizando un solo tipo de asfalto para la elaboración de mezcla asfáltica, lo cual no es adecuado, dado a que no todas las vías del país tienen los mismos niveles de servicio y están expuestas a diferentes temperaturas, lo que hace que el rendimiento varíe de un lugar a otro, y es que según explica el ingeniero Luis Guillermo Loria en el artículo de Herrera en el 2013 para La Nación, el problema del asfalto actual es que es muy rígido y es muy frágil. El resultado evidencia grietas o pierde resistencia al agua.

Por otra parte, de acuerdo con los datos estadísticos del 2015 de la Corporación Bananera Nacional por sus siglas CORBANA, el área de producción de banano tuvo un ligero aumento de un 0,3% de área con respecto al 2014, lo cual significa que la utilización de plástico tipo polietileno (PE) de baja densidad ha aumentado. “El problema radica en que la bolsa no es biodegradable y como tal no puede ser desechada directamente en el entorno” (Aguiar & Villegas, 2012, pág. 2) y es que según los mismos autores nos dice que las bolsas al estar impregnadas de clorpirifos su reciclaje no puede ser utilizado en ningún uso que tenga aplicación para el consumo humano.

Actualmente en la producción de mezcla asfáltica se utilizan polímeros como aditivos y el mercado ofrece una gran variedad, entre ellos se encuentran los de tipo polietileno, mismo material el del cual están compuestas las bolsas que se usan para la protección de la fruta del banano.

Dado que en Costa Rica, según las estadísticas de CORBANA se exportó alrededor de 101 millones de cajas de banano en el 2015, y cada racimo de fruta debe de estar protegido por una bolsa plástica, el desecho de las bolsas de polietileno causan un importante daño ecológico, incorporar este tipo de material a la producción de mezcla asfáltica ayudará a reducir el impacto que produce actualmente al medio, además puede aportar propiedades mecánicas y físicas las cuales le pueden generar durabilidad a la mezcla asfáltica, la cual es un problema actual de las carreteras de Costa Rica.

1.3 Formulación del problema

¿Cuánto aumentan los parámetros de durabilidad con la inclusión de plástico tipo PE reciclado de la industria bananera en una mezcla asfáltica?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Comparar los resultados de las propiedades mecánicas y físicas correlacionadas con la durabilidad de dos diseños de mezclas diferentes; una mezcla asfáltica con plástico reciclado tipo PE y otra mezcla asfáltica convencional con los datos proporcionados por la empresa Constructora y asesora en construcción e ingeniería S.A conocida por sus siglas como CACISA.

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar el porcentaje óptimo de asfalto para el diseño de mezcla asfáltica densa con bolsa plástica reciclada tipo PE de baja densidad a través del método Marshall de diseño de mezclas descrita en la norma AASTHO T 245.
- Obtener el valor de resistencia a la tensión diametral retenida al daño inducido por la humedad para el diseño de mezcla asfáltica densa con bolsa plástica reciclada tipo PE, de acuerdo con la AASHTO T 283.
- Obtener el valor resistencia retenida a la compresión uniaxial para el diseño de la mezcla asfáltica densa con bolsa plástica tipo PE de baja densidad, a través de las normas AASHTO T 165 y AASHTO T 167.

- Evaluar el efecto en la durabilidad que produce el uso de bolsa plástica reciclada tipo PE de baja densidad como modificante o aditivo en una mezcla asfáltica densa.

1.5 Alcances y limitaciones

1.5.1 Alcances

- Realizar un diseño de mezcla asfáltica con el porcentaje óptimo de asfalto que requiere la mezcla, que se le incorporará a la bolsa plástica reciclada tipo PE, esto con los mismos agregados, granulometría y cemento asfáltico que la mezcla asfáltica convencional.
- Obtener los valores correspondientes de vacíos en el agregado material, vacíos llenos de asfalto, estabilidad, flujo, resistencia retenida a la compresión uniaxial y resistencia a la tensión diametral retenida de la mezcla asfáltica con inclusión de bolsa plástica de banana, para ser comparados con los resultados de la mezcla asfáltica sin ninguna clase de modificante.
- Determinar el efecto que aporta la bolsa plástica reciclada tipo PE en la durabilidad de la mezcla asfáltica.

1.5.2 Limitaciones

- El objeto de estudio se llevará a cabo dentro los límites que establece el Manual de especificaciones generales de la construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2010, en la sección 418.06.02 para mezcla asfáltica en caliente para capas o sobre capas asfálticas y bacheo donde la superficie existente consiste en concreto asfáltico, donde se considera

que el tráfico es mayor a 3 millones de ejes equivalentes y los golpes de diseño Marshall son 75.

- Se utilizarán únicamente agregados con granulometría de 12,5 de tamaño máximo nominal.

- Se utilizará asfalto clasificado como AC-30.

- Se utilizarán bolsas plásticas tipo PE de baja densidad recicladas de la industria bananera, en una proporción del 3% por peso de mezcla, dándole seguimiento a la proporción propuesta por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales,

2. CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL

Para comprender de mejor manera el desarrollo de la investigación, es necesario tener claros algunos conceptos y fundamentos. Por eso a continuación vienen una serie de temas que abarcan sobre la mezcla asfáltica, el plástico reciclado de la industria bananera y pruebas de laboratorio.

2.1 Materiales

En el campo de la construcción existen diversa cantidad de materiales, de los cuales se van a detallar solo los que se involucran con el proyecto de investigación y los que se utilizan en la elaboración de pavimentos flexibles.

2.1.1 Agregados

Los agregados son los que comúnmente se le denomina como roca, material granular o agregado mineral, puede ser cualquier material mineral duro e inerte, se utiliza de manera fragmentada o graduada (Asphalt Institute, 1982, pág. 36)

Los agregados se pueden dividir según su naturaleza, ya sea en agregados sintéticos o artificiales y en agregados naturales, además, estos últimos se subdividen según su formación geológica, ya sea en sedimentarios, metamórficos y en ígneos.

2.1.1.1 Agregados artificiales

Estos agregados son todos aquellos que no se encuentran de forma natural, son el producto de algún proceso químico o físico, suelen ser subproducto de procesos industriales. El material más utilizado como agregado artificial más común es la escoria de altos hornos, es un material removido de la superficie del

hierro, la escoria se remueve y se transforma en partículas más pequeñas. (Asphalt Institute, 1982, pág. 39).

2.1.1.2 Agregados naturales

Los agregados naturales son todas aquellas rocas o material pétreo que se encuentra de forma natural en el planeta. Estos son producto de procesos naturales como la erosión y degradación de rocas más grandes dando origen a rocas más pequeña, conocidas como gravas y arenas. Las principales fuentes de agregados naturales son los ríos y canteras, aun así, los depósitos no son 100% roca, en especial las arenas, ya que suelen tener porcentajes de limos y arcillas (Asphalt Institute, 1982, pág. 37)

En algunos casos cuando las rocas son muy grandes, o no tienen la superficie o textura correcta se procesan, ya sean triturándolos o tamizándolos, para mejorar aspectos como cambiar la forma de la partícula, de una forma redonda a angular, para cambiar la forma superficial, de lisa a rugosa y para mejorar la graduación del material (Asphalt Institute, 1982, pág. 37).

Es de suma importancia procesar los agregados y clasificarlos, para que sean adecuados y aptos para la elaboración de mezcla asfáltica, ya que la forma y tamaño del agregado influye de manera directa en la calidad de la mezcla.

Los agregados naturales se pueden clasificar según su formación geológica: rocas sedimentarias, rocas ígneas y rocas metamórficas.

2.1.1.2.1 Rocas sedimentarias

Las rocas sedimentarias se forman debido al proceso natural de la erosión, los sedimentos es decir material más fino se deposita en las partes más bajas debido al arrastre del agua, donde se comprimen y forman aglomerados, y en muchas ocasiones de manera estratificada (Asphalt Institute, 1982, pág 36).

2.1.1.2.2 Rocas ígneas

Este tipo de agregado se forma a partir de la fundación de material magmático enfriado y solidificado, son rocas jóvenes, llamadas así por tener una formación reciente. Existen dos tipos de rocas ígneas, las extrusivas y las intrusivas. Las rocas extrusivas se forman en la superficie de la corteza terrestre, en diferencia a las intrusivas, que se forman en las profundidades de la corteza terrestre (Asphalt Institute, 1982, pág. 36).

2.1.1.2.3 Rocas metamórficas

Generalmente estas rocas formadas a partir de rocas sedimentarias o rocas ígneas, debido a procesos de intensa presión y calor dentro de la tierra, también se originan a partir de reacciones químicas. Por lo general, las rocas metamórficas suelen tener una forma foliada, es decir, formada en capas o líneas paralela (Asphalt Institute, 1982, pág 36).

2.1.2 Asfalto

El cemento asfáltico es un material de color negro que sirve como ligante de partículas en la producción de mezcla asfáltica, este material suele variar su consistencia dependiendo en la temperatura que se encuentre, entre más frío más duro, y entre más caliente más blando; gracias a esa particular característica es que permite mezclarse con los agregados a altas temperaturas y cuando vuelve a temperatura ambiente forma un aglomerado de consistencia solida a semisólida capaz de soportar cargas (Asphalt Institute, 1982, pág. 10).

2.1.2.1 Origen y naturaleza del asfalto

El asfalto es obtenido a través de la refinación del petróleo, por el método de destilación, este método consiste en calentar a temperaturas determinadas para obtener los productos que se derivan del petróleo, tal como se representa en la figura 1, donde se pueden observar las temperaturas típicas de

destilación, las temperaturas pueden variar dependiendo de la compañía y del tipo de petróleo (Asphalt Institute, 1982, pág. 11).

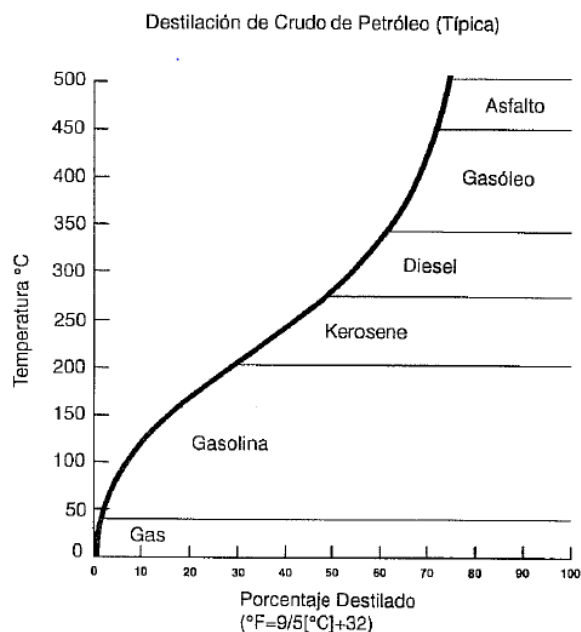


Figura 1. Productos y temperaturas típicas de destilación. Fuente: Asphalt Institute

2.1.2.2 Clasificación del asfalto y grados de asfalto

Los asfaltos se pueden clasificar de manera general en 3 tipos:

- Cemento asfáltico
- Asfalto diluido
- Asfalto emulsificado

Los tipos de asfaltos mencionados anteriormente solo se discutirán los grados del cemento asfáltico, ya que los asfaltos diluidos y asfaltos emulsificados se usan casi por completo en mezclas en frío y en riegos.

La manera de reconocer el tipo asfalto y saber algunas propiedades, es mediante como se clasifica, “El cemento asfáltico se clasifica bajo tres sistemas diferentes. Ellos son: viscosidad, viscosidad después de envejecimiento, y penetración” (Asphalt Institute, 1982, pág. 14). En Costa Rica, el ente encargado del abastecimiento de asfalto es la Refinadora Costarricense de Petróleo,

conocida más por sus siglas como RECOPE y tiene a disposición únicamente asfalto clasificado por viscosidad.

El asfalto que es clasificado según la viscosidad, se mide los poises con el asfalto a una temperatura de 60 °C; para clasificarlo se le asigna las siglas AC seguido del grado de viscosidad en hectopoises, en la tabla 1 se pueden observar algunos requisitos para cemento asfáltico clasificado por viscosidad a 60 °C, donde se observa que entre menor sea el grado de asfalto es más blando y conforme aumenta el grado es más duro; en Costa Rica el único asfalto que se comercializa es el AC-30 con una viscosidad de 3000 poises aproximadamente

Tabla 1, Requisitos para cemento asfáltico graduado por viscosidad (AASHTO M 226). Fuente: Asphalt Institute

PRUEBA	Grado de viscosidad					
	AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosidad, 60° C, poises	250±50	500±100	1000±200	2000±400	3000±600	4000±800
Viscosidad, 135° C, Cs-mínimo	125	175	250	300	350	400
Penetración, 25° C, 100 g., 5 segundos mínimos	220	140	80	60	50	40
Punto inflamador, Cleveland, °C mínimo	163	177	219	232	232	232
Solubilidad en tricloroetileno, por ciento mínimo	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0

La manera de identificar cuando se clasifica, según la viscosidad después de envejecido, es con las siglas AR y el grado de viscosidad en hectopoises, y en el tercer método de clasificación es por penetración que se identifica solo por el grado de penetración, mediante la prueba de penetración donde se mide las décimas de milímetro que penetra una aguja bajo una carga de 100g en 5 segundos.

2.2 Mezcla asfáltica

La mezcla asfáltica se compone principalmente de dos materiales, los cuales son el cemento asfáltico y los agregados pétreos. La principal aplicación de la mezcla asfáltica en carreteras de acuerdo con Padilla en el 2004 es que sirva como superficie de rodadura, donde los usuarios se sientan cómodos, seguros y que a la vez sea económica, pero además que sea capaz de transmitir de manera eficiente las cargas a las bases y sub bases según correspondan a los diseños realizados para una carretera específica con un flujo vehicular específico.

Un aspecto importante a conocer es que “En una mezcla asfáltica los agregados constituyen de entre el 90 y el 95 por ciento, en peso, y entre el 75 y el 85% por ciento, en volumen” (Asphalt Institute, 1982, pág. 36) debido a que los agregados componen la mayor parte de las mezclas asfálticas, se debe hacer uso de una selección adecuada, estos deben de tener una forma, textura y granulometría precisa.

La granulometría consiste en una serie de tamices con aberturas de tamaño variado que van estibadas conforme al tamaño de las aberturas de mayor a menor, tal como se muestra en la figura 2. En Costa Rica existe el Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2010, publicado por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes, conocido por sus siglas como el MOPT, en el cual establece una granulometría específica de acuerdo con el tamaño máximo nominal del agregado, tal y como se observa en la tabla 2.

Tabla 2, Granulometrías especificadas en el CR-2010 para mezclas asfálticas.
Fuente: CR-2010

Porcentaje pasando por peso. Tamaño máximo nominal										
Malla	37,5 mm		25 mm		19 mm		12,5 mm		9,5 mm	
	Rango especificado	Tolerancia	Rango especificado	Tolerancia	Rango especificado	Tolerancia	Rango especificado	Tolerancia	Rango especificado	Tolerancia
50,0 mm	100	---	x	x	x	x	x	x	x	x
37,5 mm	90 - 100	± 5	100	x	x	x	x	x	x	x
25,4 mm	75 - 90	± 5	90 - 100	± 5	100	x	x	x	x	x
19,0 mm	---	---	77 - 92	± 5	90 - 100	± 5	100	x	x	x
12,7 mm	42 - 65	± 5	60 - 80	± 5	68 - 90	± 5	90 - 100	± 5	100	x
9,5 mm	x	x	50 - 70	± 5	56 - 80	± 5	70 - 90	± 5	90 - 100	± 5
Nº 4	22 - 35	± 4	30 - 39	± 4	35 - 57	± 4	45 - 65	± 4	55 - 75	± 4
Nº 8	15 - 23	± 4	19 - 27	± 4	23 - 35	± 4	28 - 39	± 4	32 - 47	± 4
Nº 16	8 - 15	± 4	11 - 18	± 4	14 - 22	± 4	16 - 26	± 4	19 - 31	± 4
Nº 30	5 - 12	± 4	7 - 14	± 4	9 - 17	± 4	9 - 19	± 4	11 - 23	± 4
Nº 50	3 - 10	± 4	4 - 11	± 4	6 - 14	± 4	5 - 16	± 4	7 - 19	± 4
Nº 200	0 - 6	± 2	1 - 7	± 2	2 - 8	± 2	2 - 8	± 2	2 - 10	± 2

NOTAS:
1. La tolerancia es la desviación permisible al valor propuesto en la fórmula de mezcla para trabajo, sin salirse del rango especificado. La tolerancia es absoluta.
2. La verificación de la granulometría de la mezcla producida, se efectuará de acuerdo con la norma de ensayo AASHTO T 30.
3. Alternativamente, para la verificación de la granulometría de la fórmula de la mezcla para trabajo, se podrá utilizar agregado proveniente de la banda transportadora en plantas mezcladoras de tambor, de las tolvas cañiteo en plantas de dosificación. El agregado será utilizado de acuerdo con las normas de ensayo AASHTO T 11 y AASHTO T 27

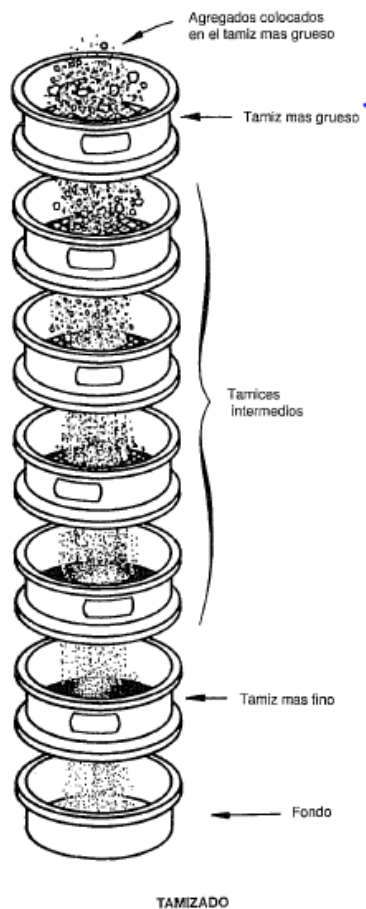


Figura 2. Análisis de tamices. Fuente: Asphalt Institute

2.2.1 Clasificación de las mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas se pueden clasificar de varias maneras, ya sea por sus vacíos, temperatura, granulometría, etc. De acuerdo con Padilla (2004) las mezclas se clasifican:

- a) Por fracciones de agregado pétreo empleado:
 - Masilla asfáltica
 - Mortero asfáltico
 - Concreto asfáltico
 - Macadam asfáltico

- b) Por la temperatura puesta en obra:
 - Mezclas asfálticas en caliente: esta clase de mezcla se realiza con asfaltos calentados a temperaturas aproximadas a los 150 °C, los agregados se mezclan a una temperatura similar, esto para que a la hora de entrar en contacto ambos materiales no se enfríen y el asfalto siga manejable.
 - Mezclas asfálticas en frío: la mezcla, por lo general se confecciona con una emulsión asfáltica a temperatura ambiente.

- c) Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica
 - Mezclas cerradas o densas: contienen una cantidad de vacíos inferior al 6%.
 - Mezclas semi cerradas o semi densas: contienen una cantidad de vacíos de 6% a 10%.
 - Mezclas abiertas: la cantidad de vacíos superior al 12%.
 - Mezclas porosas: la cantidad de vacíos es mayor al 20%.

- d) Por el tamaño máximo del agregado:
 - Mezclas gruesas: el tamaño máximo del agregado excede o es superior a los 10 mm.

- Mezclas finas: se les suele llamar micro aglomerados o morteros asfálticos, debido a que el tamaño máximo del agregado no llega a los 10 mm.
- e) Por la estructura del agregado pétreo:
- Mezclas con esqueleto mineral: su resistencia se da en mayor parte debido al rozamiento interno de los agregados.
 - Mezclas sin esqueleto mineral: su resistencia es debida únicamente a la cohesión de la masilla.
- f) Por granulometría:
- Mezclas continuas: contienen una cantidad bien distribuida de agregado en diferentes tamaños.
 - Mezclas discontinuas: al contrario de las mezclas continuas, tienen una distribución limitada de tamaños de agregado.

2.3 Asfalto modificado con polímero

De acuerdo con Maxil y Salinas (2006) afirman que:

Los materiales asfálticos modificados son el producto de la disolución o incorporación en el asfalto, de un polímero o de hule molido de neumáticos, que son sustancias estables en el tiempo y a cambios de temperaturas, que se le añaden al material asfáltico para modificar sus propiedades físicas y reológicas, y disminuir su susceptibilidad a la temperatura y a la humedad, así como a la oxidación. (Pág. 14)

La intención principal de combinar o agregar polímeros a una mezcla asfáltica es mejorar características físicas y reológicas, para hacerlo más resistente o durable, en este proyecto surge otra iniciativa, la cual es reciclar material plástico y reducir el impacto ambiental que genera el uso de bolsas plásticas de polietileno de baja densidad, este es importante ubicarlo en los diferentes tipos de polímeros que existen.

2.3.1 Tipos de polímeros

A nivel químico los polímeros se clasifican según su estructura molecular en:

- Homopolímeros
- Copolímeros
- Elastómeros

Cada uno de estas clasificaciones tiene sus propias características, pero principalmente “Los modificadores producen una actividad superficial iónica, que incrementa la adherencia en la interfase entre el material pétreo y el material asfáltico” (Maxil y Salinas, 2006, pág. 14).

A nivel comercial los principales polímeros modificadores asfálticos se clasifican en:

- Polímero tipo I.
- Polímero tipo II.
- Polímero tipo III.
- Hule molido de neumático.

2.3.1.1 *Polímero tipo I*

Este tipo de modificador se fabrica en base de un material llamado estireno y da formación a modificadores del tipo Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) o Estireno-Butadieno (SB). Es útil en mezclas asfálticas para carpetas delgadas, donde hay altos índices de tránsito, climas fríos y cálidos (Maxil y Salinas, 2006, pág. 14).

2.3.1.2 Polímero tipo II

Este modificante es fabricado a partir de polímeros elastoméricos lineales como el caucho de estireno, butadieno-látex o neopreno-látex. Es utilizado para mezclas asfálticas en donde se necesite mejorar el comportamiento de servicio tanto en climas fríos como templados (Maxil y Salinas, 2006, pág. 15).

2.3.1.3 Polímero tipo III

Estos modificantes se elaboran a partir de polímeros del tipo elastómeros como el Etil-Vinil-Acetato (EVA) o polietileno de alta o baja densidad. Es utilizado en mezclas asfálticas donde el índice de tránsito es alto y además el clima es caliente (Maxil y Salinas, 2006, pág. 15).

2.3.1.4 Hule molido de neumáticos

Este modificador se fabrica a base de molienda de neumáticos. Se utiliza en mayor parte para mezclas asfálticas en carpetas delgadas con granulometría abierta (Maxil y Salinas, 2006, pág. 16).

2.4 Características y propiedades de la mezcla asfáltica

El desempeño de una mezcla asfáltica puede medirse según las características y propiedades que presente, por eso es importante caracterizar y hacer medible las propiedades.

2.4.1 Características

Una mezcla asfáltica contiene muchas características, pero las que más se toman en cuenta para realizar una evaluación de la durabilidad son densidad, vacíos de aire, vacíos de agregado mineral y contenido de asfalto.

2.4.1.1 Densidad

La densidad está definida como el peso unitario, y se calcula al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua (1000 kg/m³ a 4 °C). La densidad obtenida del laboratorio será siempre la

densidad patrón y de referencia para los análisis en campo (Asphalt Institute, 1982, pág. 57).

La densidad es una de las características más importantes, dado que, si una densidad es alta en el pavimento terminado, es sinónimo de un rendimiento duradero y una resistencia alta al cortante.

2.4.1.2 Vacíos de aire

En una mezcla asfáltica compactada se le denomina vacíos de aire a los espacios de aire pequeños que quedan atrapados entre los agregados revestidos del cemento asfáltico. Es importante que una mezcla asfáltica compactada contenga vacíos de aire en cierta cantidad porcentual al volumen de la mezcla, para permitir una compactación adicional causada por el tráfico, estos espacios proporcionan lugares para los cuales puede fluir el cemento asfáltico (Asphalt Institute, 1982, pág. 58).

La durabilidad de una mezcla asfáltica está sujeta a la cantidad de vacíos de aire que contenga, esto a que si posee una gran cantidad de vacíos proporciona caminos o vías por la cual el agua puede transitar y llegar a deteriorar la base del pavimento.

2.4.1.3 Vacíos en el agregado mineral (VMA)

Los vacíos en el agregado mineral en el lenguaje técnico se le conoce por sus siglas en inglés como VMA, y son todos los espacios de aire que existen entre los agregados de una mezcla compactada, incluyendo el espacio que abarca el cemento asfáltico (Asphalt Institute, 1982, pág. 58). Para comprender de manera visual el concepto de VMA, en la figura 2 se muestra lo que corresponde a vacíos en el agregado mineral, sin considerar el asfalto absorbido por el agregado.

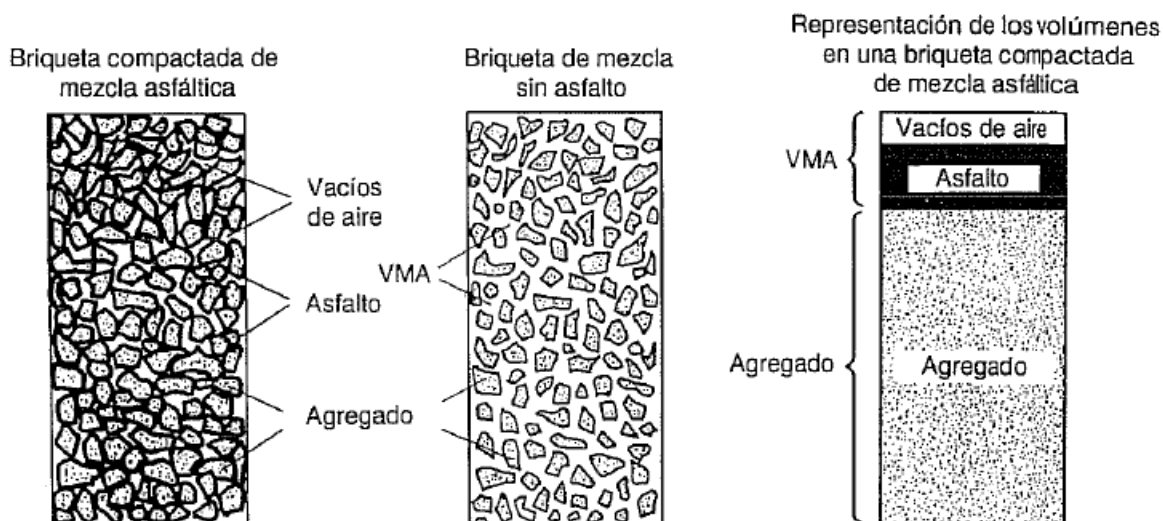


Figura 3. Ilustración del VMA en una probeta de mezcla compactada. Fuente: Asphalt Institute

Si el valor de VMA es muy grande, la mezcla será más durable, pero presentará problemas de estabilidad y consumirá mayor cemento asfáltico lo cual hace la mezcla más cara, y si el valor de VMA es muy bajo puede presentar problemas de durabilidad, por lo tanto, se han establecido valores mínimos de VMA para que exista un equilibrio entre una mezcla durable, estable y la vez económica.

2.4.1.4 Contenido de asfalto

El contenido de asfalto en una mezcla compacta es de suma importancia. El contenido se determina en laboratorio y se debe cumplir con mucha precisión en el campo. Para cada mezcla el contenido de asfalto óptimo varía, ya que la cantidad depende de la forma de los agregados, la granulometría y la absorción, ya que, si el material granular es muy fino, el área a cubrir con cemento asfáltico es mayor que si el material granular fuera grueso (Asphalt Institute, 1982, pág. 60).

Es importante controlar la cantidad de material granular de la mezcla, dado a que, si se producen variaciones y se mantiene el mismo contenido de asfalto, la mezcla se puede volver muy seca si existen muchos finos o muy

húmeda si disminuye la cantidad de agregado fino, por lo tanto, no se deben de hacer variaciones arbitrarias y se debe de proceder a realizar el diseño de mezcla adecuado al material granular.

Es importante diferenciar entre la cantidad de asfalto total y la cantidad de asfalto efectiva, ya que, la cantidad de asfalto total corresponde a la cantidad que hay que usar para que la mezcla tenga las cualidades deseadas, y el contenido de asfalto óptimo corresponde a la cantidad de asfalto que recubre la superficie de los agregados.

2.4.2 Propiedades

La mezcla asfáltica debe de contener ciertas propiedades que son deseadas para que contribuyan en una buena calidad del pavimento, por eso es de severa importancia realizar un correcto diseño de mezcla. Entre las propiedades que se buscan obtener en la mezcla están la estabilidad, durabilidad, impermeabilidad, trabajabilidad, flexibilidad, resistencia a la fatiga y resistencia al deslizamiento.

2.4.2.1 Estabilidad

Una definición muy acertada es que “La estabilidad de un asfalto es su capacidad para resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas de tránsito” (Asphalt Institute, 1982, pág. 61). De esta manera, la mezcla asfáltica es estable y capaz de resistir las cargas cíclicas manteniendo aún su forma original. La estabilidad se puede desarrollar de diferentes maneras, una es utilizando un cemento asfáltico con mayor densidad o una granulometría más densa, esto debido a que la estabilidad depende de la cohesión interna y de la fricción entre partículas, muy similar a como pasa en los suelos. Es preciso no producir mezclas muy estables ya que el pavimento se vuelve muy rígido y lo hace menos durable.

2.4.2.2 Durabilidad

Una de las propiedades más importantes y deseadas en la mezcla asfáltica es la durabilidad, que es la capacidad de soportar o resistir a factores climáticos, de carga y cambios en el cemento asfáltico como la oxidación y polimerización. Para lograr que una mezcla asfáltica sea durable se puede a través de cuatro razones: utilizar el mayor contenido de cemento asfáltico posible, utilizar una graduación densa del agregado pétreo, compactar la mezcla lo máximo posible para obtener mayor impermeabilidad y utilizando aditivos o modificantes del asfalto (Asphalt Institute, 1982, pág. 62).

2.4.2.3 Resistencia a la fatiga

Este concepto se puede definir como “La resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito” (Asphalt Institute, 1982, pág. 64). La durabilidad de una mezcla está afectada directamente por la resistencia a la fatiga y al nivel de tránsito; ya que, si el nivel de tránsito es muy alto va a tener muchas repeticiones de carga y agrietar el pavimento, es por esto que además de diseñar una buena mezcla de concreto asfáltico es importante diseñar el espesor del pavimento de acuerdo al nivel de tránsito para que la durabilidad de la mezcla no sea confundida o afectada por una falla producida por fatiga.

2.5 Método Marshall de diseño de mezclas asfálticas

El método Marshall de diseño de mezclas asfálticas lo normó la AASHTO T 245 a través de una serie de pasos y procesos a seguir que estandarizan los resultados conforme las propiedades y características involucradas en el diseño de mezcla, para concluir con un diseño de mezcla adecuado y de buena calidad.

Como propósito principal, el método Marshall, que lleva el nombre de su desarrollador Bruce Marshall, es cuantificar el contenido óptimo de asfalto para

una graduación de agregados específicas; además, provee información sobre algunas características y propiedades que ayudan a determinar su efecto en la durabilidad de la mezcla asfáltica.

2.5.1 Procedimientos generales

Debido a que las propiedades del cemento asfáltico y los agregados varían, es importante realizar el diseño de mezcla respectivo, esto se debe a que las propiedades de los materiales involucrados van a determinar las características finales de la mezcla asfáltica.

2.5.1.1 Selección de muestras

Como primer paso para realizar el método de diseño Marshall se deben de extraer muestras de agregado, del cemento asfáltico y en este caso el aditivo que representen lo más fiel posible a una producción macro de mezcla asfáltica. Si los agregados, el cemento asfáltico y el aditivo varían entre pruebas los resultados a ser totalmente distintos y sin lógica alguna (Asphalt Institute, 1982, pág. 71).

2.5.1.2 Preparación del agregado pétreo

Es importante conocer las características mínimas del agregado pétreo que se utilizará para los ensayos y además de prepararlos de manera adecuada para la posterior mezcla con el cemento asfáltico.

Para utilizar el agregado y realizar un correcto diseño de mezcla, el manual MS-22 del Asphalt Institute dicta que en el método Marshall se debe:

- Secar el agregado y dejarlo libre de humedad, ya que cualquier residuo de agua puede afectar los resultados de los ensayos, es por esto que cada muestra que se va utilizar para los ensayos se coloca en bandejas y se

seca en horno a 110 °C; después de determinado tiempo se retira del horno se calcula su peso en caliente se registra el valor, y se calienta por segunda ocasión y se vuelve a pesar después de un tiempo hasta que el valor obtenido sea constante en al menos dos ocasiones consecutivas.

- Realizar un análisis granulométrico, dado que es importante conocer las proporciones y tamaños del agregado de muestra para realizar los ensayos y que cumplan con las especificaciones que establece el CR-2010.
- Se debe de determinar el peso específico de los agregados, esto es conocer la proporción peso-volumen del agregado comparada con la proporción peso-volumen del agua a 4 °C. El fin de determinar el peso específico de los agregados es para determinar las proporciones de agregado, cemento asfáltico, vacíos y en algunos casos aditivo.

2.5.1.3 Preparación de las probetas de ensayo

Para realizar el ensayo se conforman varias probetas o pastillas de mezcla asfáltica, donde a cada probeta se le cambia ligeramente el contenido de asfalto; con el fin determinar el contenido exacto de cemento asfáltico óptimo que proporciona las características y propiedades deseadas para la mezcla.

Las proporciones de agregado, cemento asfáltico y aditivo en algunos casos están dadas por los resultados de la granulometría y densidad del agregado pétreo.

Las muestras se preparan: primeramente, calentando el agregado y el cemento asfáltico mezclándolo hasta que todas las partículas del agregado estén completamente recubiertas del cemento asfáltico, por consiguiente, la mezcla se coloca en moldes previamente calentados para prepararlos para la compactación; por último, los moldes se compactan por medio del martillo Marshall previamente calentado para que no exista pérdida o transferencia de calor, con la cantidad de golpes por cara según sea el diseño en 35, 50 o 75 golpes (Asphalt Institute, 1982, pág. 74).

2.5.1.4 Determinación de propiedades y características

Una vez que las probetas hayan enfriado a temperatura ambiente, se le realizan ensayos normados por la AASHTO para registrar las propiedades y características. Entre las propiedades que se miden están:

- Se determinan el peso específico total la cual es esencial para realizar un análisis de la relación densidad-vacíos.
- Se realiza los ensayos de estabilidad y fluencia que son medidos de forma simultánea, ya que se le aplica una carga y se mide la deformación.

Se realiza el análisis de densidad y vacíos que consiste en determinar de forma porcentual la cantidad de vacíos, se analiza el valor de VMA y VFA para correlacionarlo con la durabilidad de la mezcla.

2.6 Procedimiento para determinar la resistencia a la tensión diametral retenida

Este ensayo es importante debido a que permite determinar el potencial al daño por humedad y también predecir el desnudamiento a largo plazo de las mezclas asfálticas.

Para realizar este ensayo es necesaria la confección de 8 especímenes, y 2 especímenes de prueba para determinar la carga necesaria para que los especímenes tengan aproximadamente un 7% de vacíos. El grupo de 8 especímenes, moldeados a la carga determinada por los de prueba, se dividen en 2 subgrupos los cuales contengan una cantidad de vacíos similares. El primer subgrupo se mantiene seco y el otro subgrupo se condiciona a una saturación parcial y se mantienen así durante 24 horas aproximadamente en agua a 60°C. Después cada subgrupo se falla a la tensión diametral, el potencial al daño por la humedad se indica como la razón de resistencia que existe entre los dos subgrupos (LANAMME).

Para obtener mayor detalle de cómo se realiza el ensayo, lo preferible es dirigirse a la norma de la AASHTO T 283, donde aparecen los procedimientos normados y el equipo necesario.

2.7 Procedimiento para determinar la resistencia retenida a la compresión uniaxial

Este método resulta importante porque al igual que la prueba de resistencia a tensión diametral, permite medir la susceptibilidad a la humedad; pero en conjunto con otras propiedades permite la caracterización completa de la mezcla asfáltica y determina su uso apropiado en condiciones de carga, como por ejemplo en autopistas.

Se requiere de 8 especímenes, además dos especímenes más de prueba para determinar la carga de compresión para que haya un porcentaje de vacíos de entre un 6 y 8 por ciento; una vez determinada la carga de compresión, se moldean los 8 especímenes y se dividen en dos subgrupos, uno para ser fallado en condición seca, y otros en condición húmeda en un baño de agua de 60 °C. Ambos subgrupos se reservan 24 horas aproximadamente y se fallan a compresión uniaxial (LANAMME).

Para obtener mayor detalle de cómo se realiza el ensayo, lo preferible es dirigirse a las normas de la AASHTO T 165 y AASHTO T 167, donde aparecen los procedimientos normados y el equipo necesario.

2.8 Bolsa plástica reciclada tipo PE de baja densidad para protección del fruto de banano

La bolsa plástica que se utiliza para proteger la fruta del banano y hacerla crecer en óptimas condiciones para su posterior exportación, está hecha de polietileno (PE), material producido a partir de petróleo y gas natural. El PE es un material que toma cientos de años en degradarse y, desde el punto de vista ambiental, es altamente contaminante, ya que pone en peligro la vida de muchos

seres vivos; uno de los problemas graves de la bolsa plástica utilizada en la protección del fruto del banano es el contenido de clorpirifos, el cual hace imposible la reutilización del PE para productos de uso humano (Torres, Bernal & Castaño, 2013, pág. 95).

En el 2014, la producción de banano alcanzó los 110 millones cajas exportadas (Corbana, 2016, parr. 1), que deja en evidencia la gran cantidad de material plástico utilizado para la protección de la fruta.

3. CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO

3.1 Definición del enfoque y método de investigación

El proyecto consiste en una investigación de laboratorio que se basa en el análisis de resultados de pruebas estandarizadas que simulan un ambiente artificial lo más similar al real. Se enfocará en la comparación de resultados que resulten de las pruebas que se realicen en el laboratorio.

3.2 Sujetos y fuentes de información

Los principales sujetos presentes durante el desarrollo de la investigación se encuentran los técnicos de laboratorio de la empresa CACISA, representada por el ingeniero Carlos Solís Molina, la empresa es especializada en la asesoría de construcción de Ingeniería Civil en todas las especialidades, se encuentra inscrita desde el año 1992 en el Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos.

La principal fuente de información en la investigación serán los resultados de las pruebas estandarizadas que se realizarán en el laboratorio, acompañada de la experiencia y conocimiento de los ingenieros y técnicos de la empresa CACISA, así como los datos del informe de ensayo INF 2861-2016 del 1 de julio del 2016, que realizó la empresa CASICA para la empresa Constructora Pavicen, a un diseño de mezcla que se comercializa actualmente.

Como fuentes secundarias estarán los libros y especificaciones consultados de diferentes fuentes que fortalecerán el análisis de los resultados.

3.3 Definición de variables

Al tratarse de una investigación de índole cuantitativa, se cuenta con gran cantidad de variables, las más representativas y que servirán para realizar el análisis de datos son:

- Estabilidad: “Es una medida de carga bajo la cual una probeta cede o falla totalmente” (Asphalt Institute, 1982, pág. 76). La carga será medida en kilogramos.
- Flujo: “Medida en centésimas de pulgada representa la deformación de la briqueta” (Asphalt Institute, 1982, pág. 77). Debido a que en Costa Rica se usa el Sistema Internacional de Unidades, el flujo en esta investigación será medido en centésimas de centímetros.
- Vacíos en el agregado mineral: “Espacio intergranular de vacíos que se encuentra entre las partículas de agregado de la mezcla de pavimentación compactada” (Asphalt Institute, 1982, pág. 78). Se expresa como un porcentaje del volumen total de la mezcla.
- Vacíos llenos de asfalto: “son el porcentaje de vacíos intergranulares entre las partículas de agregado que se encuentran llenos de asfalto” (Asphalt Institute, 1982, pág. 79). Se expresa como un porcentaje del volumen total de vacíos en el agregado mineral.
- Resistencia a la compresión uniaxial: “es el esfuerzo de compresión axial máximo que puede tolerar una muestra cilíndrica recta de material antes de fracturarse” (Schlumberger, s.f., parr. 1). El manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes especifica que los valores que se deben obtener son una relación en porcentaje de la

resistencia en kg/cm^2 de unas probetas en condición seca y otras en condición saturada.

- Resistencia a la tensión diametral: es la carga máxima que puede soportar una muestra cilindra a través de su diámetro antes de fallar. El manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes especifica que los valores que se deben obtener, es una relación en porcentajes de las cargas en kilogramos de unas probetas en condición seca y otra en condición saturada.

3.4 Instrumentos empleados en la recolección de datos

Se utilizarán instrumentos de laboratorio normados y calibrados junto con técnicas normadas por la ASTM que estandarizan los procedimientos para la recolección de datos.

A continuación se enumera una lista de herramientas que se utilizarán para recolectar los datos.

1. Balanza con presión de 0.1 gramos
2. Termómetro digital con precisión de 0.1 °C
3. Espátulas
4. Guantes de cuero
5. Plantilla de gas con válvulas de gas
6. Picnómetros
7. Bomba de vacío
8. Tamices
9. Bandejas
10. Bolsas de papel
11. Moldes cilíndricos de metal
12. Baldes plásticos

13. Prensa hidráulica con medición de deformación y carga.
14. Martillo Marshall
15. Hornos eléctricos
16. Filtros de papel
17. Secadora
18. Molde cónico
19. Varilla para apisonado
20. Cucharas

3.5 Muestras y técnicas de muestreo

Todas las muestras serán obtenidas como lo establecen las normas AASHTO. Se realizarán dos diseños de mezcla asfáltica, uno convencional y otro con adición de plástico tipo PE de baja densidad en una proporción del 3% de la masa del cemento asfáltico; una vez determinados los porcentajes óptimos de asfalto, se procederá a moldear los especímenes para las pruebas de resistencia a tensión diametral y resistencia retenida a compresión uniaxial para ambos diseños de mezcla asfáltica. Por lo tanto, para ambos diseños se realizará un estudio a 30 especímenes para determinar estabilidad y flujo, 16 para determinar resistencia a tensión diametral, 16 para determinar resistencia a la compresión uniaxial y 4 muestras de mezcla asfáltica para determinar la gravedad específica máxima teórica.

3.6 Procesamiento y análisis de datos

Para una mejor comprensión del procesamiento y análisis de datos se muestra a continuación una tabla (Tabla 3) con el resumen de las actividades, herramientas, métodos de ensayo y los resultados esperados en cuanto a cada objetivo.

Tabla 3. Resumen de actividades, herramientas, métodos de ensayo y resultados esperados en función de cada objetivo. fuente propia

Objetivo	Actividades	Herramientas y métodos de ensayo	Resultados
----------	-------------	----------------------------------	------------

<p>1 Determinar el porcentaje óptimo de asfalto para el diseño de mezcla asfáltica densa con inclusión de plástico tipo PE de baja densidad.</p>	<p>-Mezclar el plástico tipo PE de baja densidad con el cemento asfáltico</p> <p>-Determinar la gravedad específica de los agregados gruesos y finos.</p> <p>-Tamizar los agregados pétreos, y almacenarlos según los diferentes tamaños.</p> <p>-Realizar los baches con los pesos de cada tamiz para obtener una granulometría uniforme y de acuerdo con los requerimientos del CR-2010.</p> <p>-Mezclar los baches de agregado pétreo con los diferentes porcentajes de cemento asfáltico y realizar el curado.</p> <p>-Moldear las pastillas con el martillo Marshall a 75 golpes por cada cara.</p> <p>-Obtener la gravedad máxima teórica de las mezclas asfálticas densas sueltas.</p> <p>-Determinar la gravedad específica bruta de las mezclas asfálticas densas compactadas.</p> <p>-Calcular vacíos en el agregado mineral VMA y contenido de vacíos llenos de asfalto VFA.</p> <p>-Fallar las probetas cilíndricas en la prensa</p>	<p>Herramientas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Plantilla de gas. - Termómetro digital. - Vara de metal. - Cubeta metálica - Picnómetros - Tamices de 19mm, 12.7mm, 9mm, N4, N8, N16, N30, N50 y N200. - Balanza digital - Bandejas - Bolsas de papel - Moldes cilíndricos de metal - Martillo Marshall - Cubeta plástica - Olla y cucharon metálico. - Prensa hidráulica - Deflectómetro - Espátula - Molde cónico - Varilla para apisonar - Secadora - Cucharas <p>Métodos de ensayo:</p> <ul style="list-style-type: none"> - AASHTO T 85 - AASHTO T 84 - AASHTO T 27 - AASHTO T 209 - AASHTO T 245 - AASHTO T 166 	<p>-Granulometría.</p> <p>-Gravedad específica bruta de los agregados gruesos y finos.</p> <p>-Gravedad específica de las mezclas compactadas.</p> <p>-Gravedad máxima teórica de las mezclas asfálticas.</p> <p>-Estabilidad.</p> <p>-Flujo.</p> <p>-Vacíos de agregado mineral.</p> <p>-Vacíos llenos de asfalto.</p> <p>-Contenidos óptimos de cemento asfáltico.</p>
--	--	---	--

	hidráulica.		
2 Obtener los valores de resistencia a la tensión diametral retenida al daño inducido por la humedad para el diseño de mezcla asfáltica densa con inclusión de plástico tipo PE de baja densidad.	<p>-Mezclar el plástico tipo PE de baja densidad con el cemento asfáltico.</p> <p>-Tamizar los agregados pétreos, y almacenarlos según los diferentes tamaños.</p> <p>-Realizar los baches con los pesos de cada tamiz para obtener una granulometría uniforme y de acuerdo con los requerimientos del CR-2010.</p> <p>-Mezclar los baches de agregado pétreo con los porcentajes óptimos de cemento asfáltico y realizar el curado.</p> <p>-Moldear los especímenes de prueba para determinar la cantidad de golpes para obtener un 7% de vacíos en las mezclas asfálticas compactadas.</p> <p>-Determinar la gravedad específica de los especímenes de prueba compactados y posteriormente calcular el porcentaje de vacíos.</p> <p>-Moldear los especímenes a la cantidad de golpes correspondientes con el martillo Marshall.</p> <p>-Determinar la gravedad específica de los especímenes compactados para posteriormente realizar</p>	<p>Herramientas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Plantilla de gas. - Termómetro digital. - Vara de metal. - Cubeta metálica - Tamices de 19mm, 12.7mm, 9mm, N4, N8, N16, N30, N50 y N200. - Balanza digital - Bandejas - Bolsas de papel - Moldes cilíndricos de metal - Martillo Marshall - Cubeta plástica - Olla y cucharón metálico. - Prensa hidráulica - Espátula - Bomba de vacío - Baño de agua con temperatura controlable. <p>Métodos de ensayo:</p> <ul style="list-style-type: none"> -AASHTO T 283 -AASHTO T 27 -AASHTO T 166 	<p>-Granulometría.</p> <p>-Gravedad específica bruta de los especímenes compactados.</p> <p>-Resistencia a la tensión diametral.</p> <p>-Índice de resistencia a la tensión diametral al daño inducido por la humedad.</p>

	<p>el cálculo de vacíos.</p> <p>-Agrupar los especímenes en dos grupos, unos para ser fallados en condición seca y otros en condición saturados.</p> <p>-Llevar a un 75% de saturación aproximadamente a los especímenes que van hacer fallados en condición saturada y mantener durante 24 horas en agua a 60°C aproximadamente.</p> <p>-Fallar ambos grupos de especímenes.</p>		
<p>3 Obtener los valores resistencia retenida a la compresión uniaxial para el diseño de mezclas asfáltica densa con inclusión de plástico tipo PE de baja densidad.</p>	<p>-Mezclar el plástico tipo PE de baja densidad con el cemento asfáltico.</p> <p>-Tamizar los agregados pétreos, y almacenarlos según los diferentes tamaños.</p> <p>-Realizar los baches con los pesos de cada tamiz para obtener una granulometría uniforme y de acuerdo con los requerimientos del CR-2010.</p> <p>-Mezclar los baches de agregado pétreo con los porcentajes óptimos de cemento asfáltico y realizar el curado.</p> <p>-Moldear los especímenes de prueba, para determinar la presión y obtener un 7%</p>	<p>Herramientas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Plantilla de gas. - Termómetro digital. - Vara de metal. - Cubeta metálica - Tamices de 19mm, 12.7mm, 9mm, N4, N8, N16, N30, N50 y N200. - Balanza digital - Bandejas - Bolsas de papel - Moldes cilíndricos de metal - Cubeta plástica - Olla y cucharón metálico. - Prensa hidráulica - Espátula - Bomba de vacío - Baño de agua 	<p>-Granulometría.</p> <p>-Gravedad específica bruta de los especímenes compactados.</p> <p>-Resistencia retenida a la compresión uniaxial.</p> <p>-Índice de resistencia retenida a la compresión uniaxial al daño inducido por la humedad.</p>

	<p>de vacíos en las mezclas asfálticas compactadas.</p> <p>-Determinar la gravedad específica de los especímenes de prueba compactados y posteriormente calcular el porcentaje de vacíos.</p> <p>-Moldear los especímenes a la presión requerida con la prensa hidráulica</p> <p>-Determinar la gravedad específica de los especímenes compactados para posteriormente realizar el cálculo de vacíos.</p> <p>-Agrupar los especímenes en dos grupos, unos para ser fallados en condición seca y otros en condición saturados.</p> <p>-Colocar en agua los especímenes que van hacer fallados en condición saturada y mantener durante 24 horas a 60°C aproximadamente.</p> <p>-Fallar ambos grupos de especímenes.</p>	<p>con temperatura controlable.</p> <p>Métodos de ensayo: -AASHTO T 165 -AASHTO T 167 -AASHTO T 27 -AASHTO T 166</p>	
<p>4 Evaluar el efecto en la durabilidad que produce el uso de bolsa plástica reciclada tipo PE de baja densidad</p>	<p>-Comparar resultados de las mezclas asfálticas densas y analizar el efecto que propicio la inclusión de bolsa plástica reciclada tipo PE de baja densidad.</p>	<p>Herramientas: - Hojas de cálculo.</p>	<p>-Pros y contras de la utilización de bolsas plásticas recicladas tipo PE de baja densidad</p>

como modificante o aditivo en una mezcla asfáltica densa.			
--	--	--	--

4. CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los datos obtenidos del laboratorio de CACISA, la empresa donde se desarrollaron los ensayos respectivos para obtener los siguientes datos.

4.1 Granulometría de diseño

Tabla 4. Granulometría de diseño, con las tolerancias que especifica el manual CR-2010.

Tamiz	Porcentaje pasando	Tolerancias y especificaciones para tamaño máximo nominal 12,5 mm	
		Min (%)	Max (%)
19,00 mm	100	100	100
12,5 mm	100	90	100
9,5 mm	84	70	90
N° 4	55	45	65
N° 8	35	28	39
N° 16	22	16	26
N° 30	15	9	19
N° 50	12	5	16
N° 200	5,7	2	8

En la tabla 4 se puede evaluar que el ensayo granulométrico normado por la AASHTO T 27 de los agregados mezclados con los pesos correctos dieron como resultado que se encuentran dentro de las especificaciones que establece el manual CR-2010, en la sección 418.04.02.01, en la página 336. Para comprender de mejor manera los resultados, en la figura 4 se muestra en rojo la curva granulométrica del ensayo realizado; y en azul, los límites superiores e inferiores que establece el manual CR-2010 para un agregado de tamaño máximo nominal de 12,5 mm.

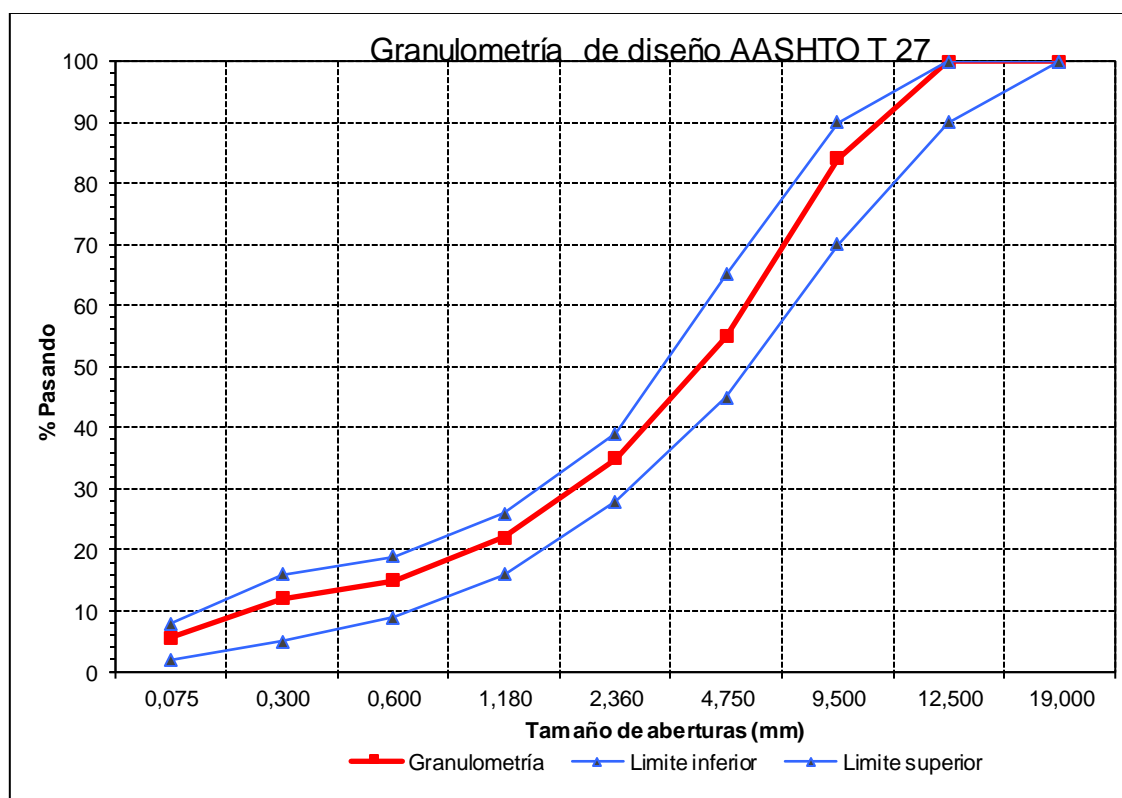


Figura 4. Granulometría de diseño.

En el gráfico anterior se puede apreciar que, a pesar de cumplir con las especificaciones, la curva granulométrica tiende a estar más cercana a los límites superiores, de tal manera que para la malla de 12,5 mm, el valor es el de la especificación, esto demuestra que el agregado pétreo tiende a ser más fino que la media.

4.2 Gravedad específica de los agregados de diseño

A continuación, se muestran los diferentes valores de la gravedad específica bruta de los agregados grueso y finos; además de la bruta ponderada, considerando que la mezcla de los agregados corresponde a un 55% de gruesos y un 45% de finos.

4.2.1 Gravedad específica bruta del agregado grueso

Como resultado del ensayo, la gravedad específica bruta de los agregados gruesos de acuerdo con la norma AASHTO T 85 dio como resultado 2,624.

4.2.2 Gravedad específica bruta del agregado fino

La gravedad específica bruta de los agregados finos de acuerdo con de acuerdo con la norma AASHTO T 84 dio como resultado 2,564.

4.2.3 Gravedad específica bruta ponderada

Tal y como se explicó en el punto 4.1, la ponderación se hace tomando en cuenta que un 55% corresponde a agregado grueso, y un 45% a agregado fino, dando como resultado una gravedad específica bruta de 2,591.

4.3 Gravedades específicas máximas teóricas

A continuación, se muestran las gravedades específicas máximas teóricas obtenidas para el diseño de mezcla con plástico y el diseño de mezcla sin plástico.

4.3.1 Gravedades específicas máximas teóricas para mezcla asfáltica convencional

En la tabla 5, se muestran los resultados de la gravedad específica máxima teórica de los puntos extremos del método de diseño Marshall.

*Tabla 5. Gravedades específicas máximas teóricas de la mezcla asfáltica convencional.
Fuente: Informe INF.2861-2016 CACISA*

Porcentaje de asfalto sobre mezcla	Gravedad específica máxima teórica, AASHTO T 209	
	Sin absorción	Con absorción
5	2,494	2,491
7	2,418	2,414

En la figura 5 se puede observar la tendencia de la gravedad específica máxima teórica para la mezcla asfáltica convencional.

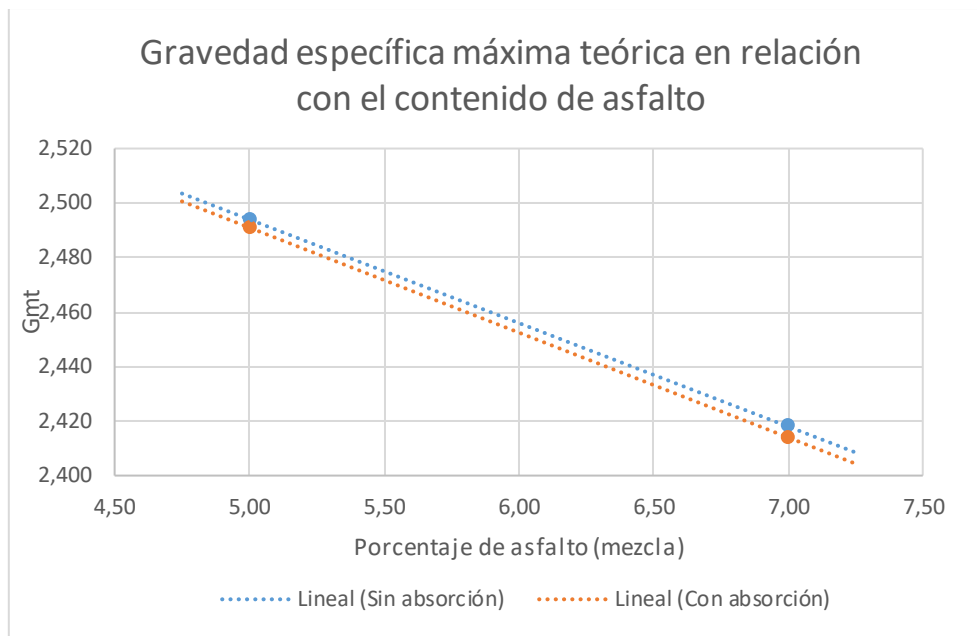


Figura 5. Tendencia de la gravedad específica máxima teórica para mezcla asfáltica convencional. Fuente: Informe INF.2861-2016 CACISA

4.3.2 Gravedades específicas máximas teóricas para mezcla asfáltica con inclusión de bolsa plástica reciclada tipo PE de baja densidad

En la tabla 6, se muestran los resultados de la gravedad específica máxima teórica de los puntos extremos del método de diseño Marshall.

Tabla 6. Gravedades específicas máximas teóricas de la mezcla con inclusión de plástico.

Porcentaje de asfalto sobre mezcla	Gravedad específica máxima teórica, AASHTO T 209	
	Sin absorción	Con absorción
5	2,514	2,500
7	2,436	2,423

Los resultados de la tabla anterior reflejan que, la gravedad específica máxima teórica de la mezcla con inclusión de plástico tipo PE de baja densidad aumenta los valores tanto de la gravedad específica máxima teórica con absorción como sin absorción, esto se puede deber a que el material plástico aporta de manera significativa al peso de la mezcla asfáltica.

En la figura 6 se puede observar la tendencia de la gravedad específica máxima teórica para la mezcla asfáltica con inclusión de plástico tipo PE de baja densidad.

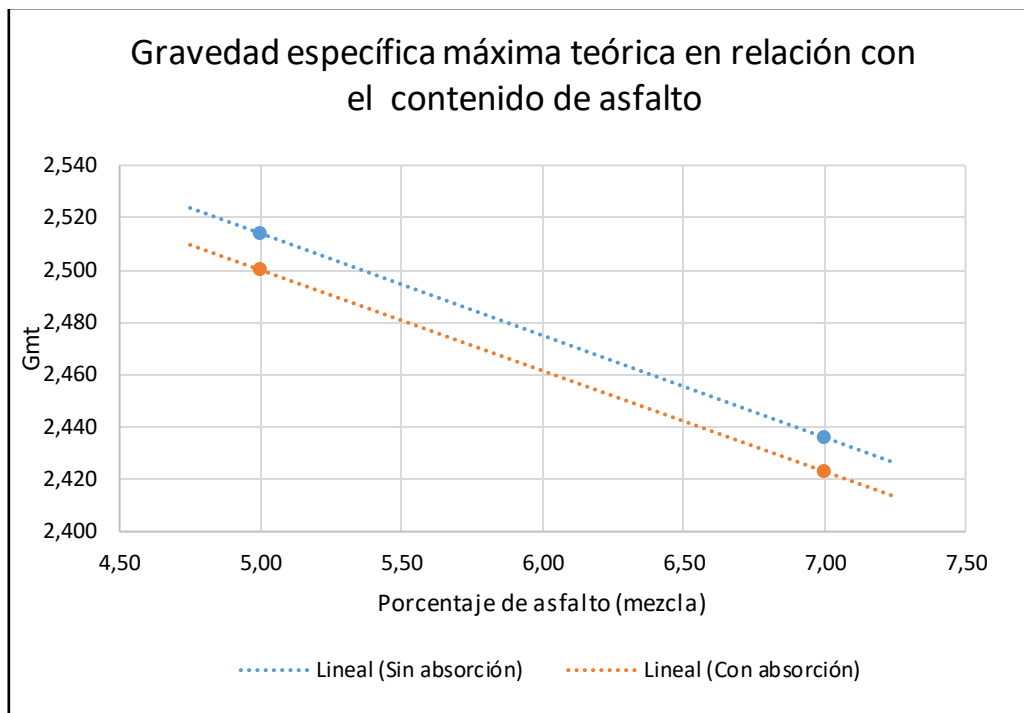


Figura 6. Gravedad específica máxima teórica en relación del contenido de asfalto para la mezcla con inclusión de plástico tipo PE de baja densidad.

En el gráfico de la figura anterior se puede observar que con diferencia al gráfico de la figura 5, la línea de tendencia de la gravedad específica máxima teórica con absorción se encuentran más esperadas de la de tendencia sin absorción.

4.4 Diseño de mezcla asfáltica por el método Marshall AASHTO T 245

Se realizan 15 especímenes con diferente contenido de asfalto para los dos tipos de diseño de mezcla asfáltica y se evalúan las propiedades Marshall en cada espécimen.

4.4.1 Diseño de mezcla asfáltica convencional

En la tabla 7 se pueden ver los resultados de todos los especímenes para las pruebas del método de diseño Marshall.

Además, en la tabla 8 se puede observar el resumen de las propiedades Marshall para el diseño de mezcla convencional.

Tabla 7. Diseño de mezcla convencional, Propiedades Marshall. Fuente: Informe INF. 2861-2016 CACISA

RESULTADOS DE ANALISIS MARSHALL												
% Asfalto Sobre la Mezcla	# Pastilla	Masa Seca (g)	Masa Superf. Sat. Seca	Masa Sumerg. (g)	Volumen (cm ³)	Gravedad Específica Bruta (AASHTO T 166)	Gravedad Máxima teórica (AASHTO T 209)	% Vacíos (AASHTO T 269)	Estabilidad (kg)	Flujo (1/100 cm)	VMA	VFA
									AASHTO T 245			
5,00	1	1163,4	1168,6	668,2	500,4	2,325	2,491	6,6	1684,8	28,1	14,7	54,9
	2	1169,6	1174,3	669,4	504,9	2,316	2,491	7,0	1664,0	29,5	15,1	53,6
	3	1165,2	1169,7	667,5	502,2	2,320	2,491	6,8	1721,2	35,1	14,9	54,2
					Promedio	2,321	2,491	6,8	1690	30,9	14,9	54,2
5,50	4	1174,2	1180,3	677,1	503,2	2,333	2,472	5,6	1660	30,1	14,9	62,4
	5	1175,6	1179,2	676,8	502,4	2,340	2,472	5,3	1723	35,2	14,6	63,6
	6	1173,9	1177,6	674,5	503,1	2,333	2,472	5,6	1664	29,5	14,9	62,4
						Promedio	2,336	2,472	5,5	1682	31,6	14,8
6,00	7	1180,3	1182,9	680,4	502,5	2,349	2,453	4,2	1701	31,2	14,8	71,4
	8	1179,6	1181,5	679,2	502,3	2,348	2,453	4,2	1716	32,3	14,8	71,3
	9	1181,4	1183,7	680,6	503,1	2,348	2,453	4,3	1746	33,2	14,8	71,2
						Promedio	2,348	2,453	4,2	1721	32,2	14,8
6,50	10	1181,9	1182,6	682,3	500,3	2,362	2,433	2,9	1622	34,7	14,7	80,2
	11	1184,3	1185,9	684,2	501,7	2,361	2,433	3,0	1641	35,0	14,8	79,8
	12	1183,2	1185,0	684,1	500,9	2,362	2,433	2,9	1628	34,7	14,7	80,1
						Promedio	2,362	2,433	2,9	1630	34,8	14,7
7,00	13	1180,3	1181,0	683,4	497,6	2,372	2,414	1,7	1587	37,3	14,8	88,3
	14	1179,5	1180,2	682,2	498,0	2,368	2,414	1,9	1559	37,1	15,0	87,4
	15	1182,6	1183,6	684,2	499,4	2,368	2,414	1,9	1572	36,8	15,0	87,3
						Promedio	2,370	2,414	1,8	1573	37,1	14,9

Tabla 8. Tabla resumen de propiedades Marshall para la mezcla convencional. Fuente: Informe INF.2861-2016 CACISA

TABLA RESUMEN DE RESULTADOS							
CONTENIDO BITUMEN (%) MEZCLA	CONTENIDO BITUMEN (%) AGREGADO	DENSIDAD (Kg/m ³)	ESTABILIDAD (kg)	FLUJO (cm/100)	VACIOS (%)	V.M.A. (%)	VFA (%)
5,00	5,25	2,321	1690	30,9	6,83	14,9	54,2
5,50	5,80	2,336	1682	31,6	5,51	14,8	62,8
6,00	6,36	2,348	1721	32,2	4,24	14,8	71,3
6,50	6,92	2,362	1630	34,8	2,94	14,7	80,0
7,00	7,49	2,370	1573	37,1	1,84	14,9	87,7

Para un mejor estudio de datos, y así determinar el diseño de mezcla que cumpla con las especificaciones del CR-2010, en las figuras 7, 8, 9, 10, 11 y 12 se encuentran graficadas las propiedades Marshall en relación con la cantidad bitumen sobre la mezcla en total.

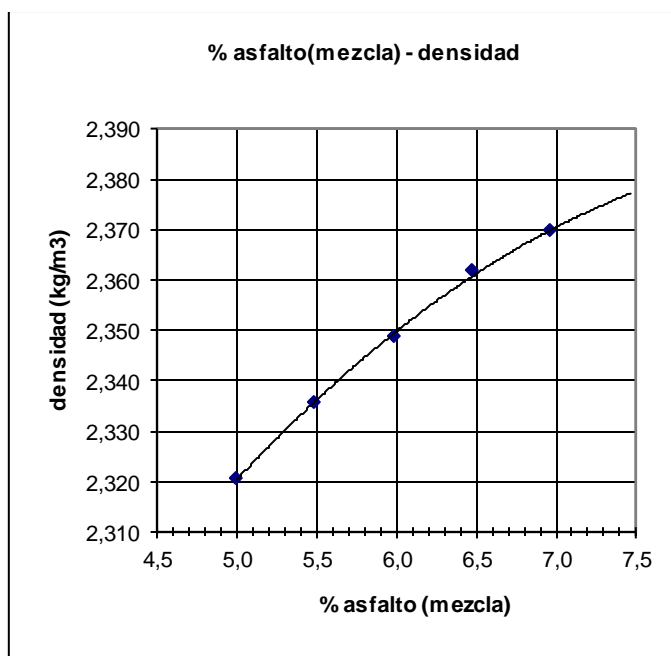


Figura 7. Relación del contenido de asfalto con la densidad de la mezcla asfáltica convencional. Fuente: Informe INF.2861-2016 CACISA

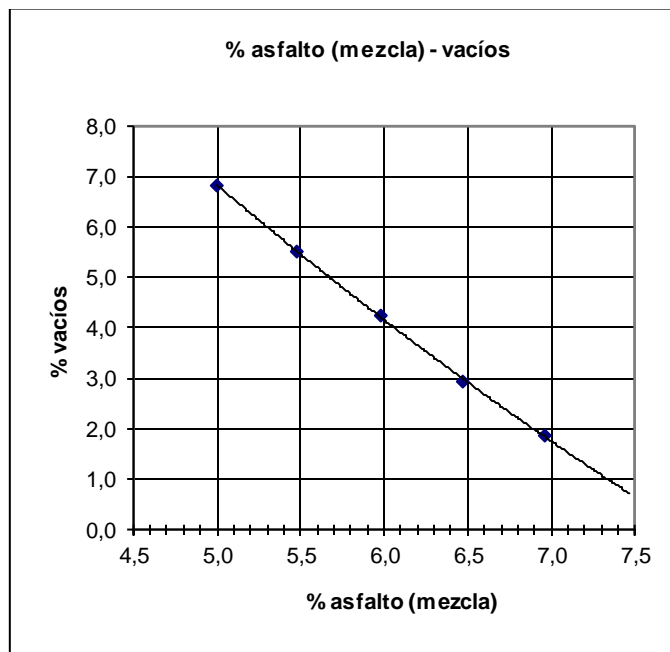


Figura 8. Relación del contenido de asfalto con el contenido de vacíos de la mezcla asfáltica convencional.
Fuente: Informe INF. 2861-2016 CACISA

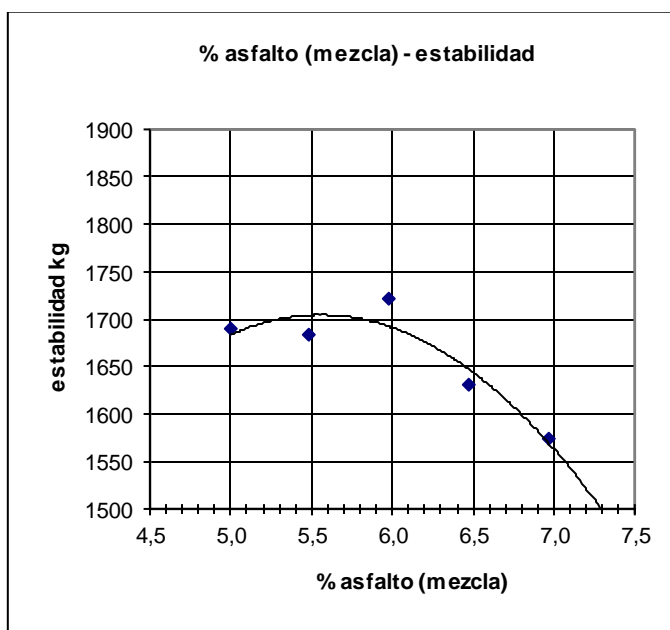


Figura 9. Relación del contenido de asfalto con la estabilidad de la mezcla asfáltica convencional. Fuente:
Informe INF. 2861-2016 CACISA

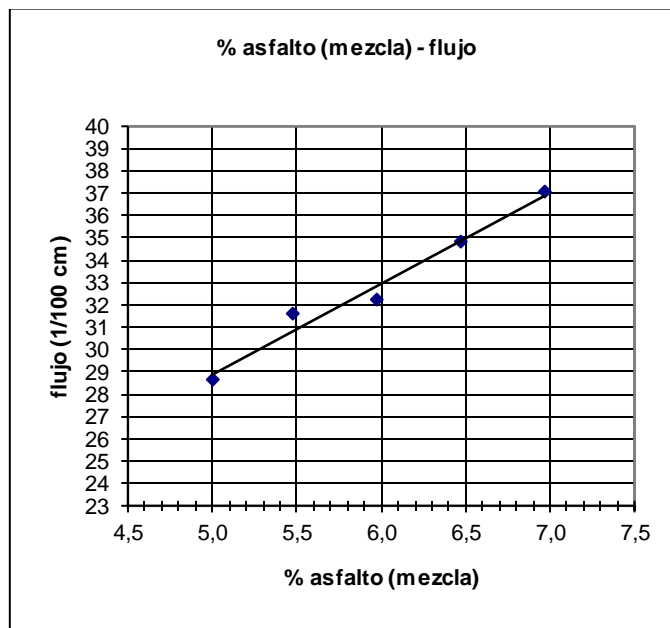


Figura 10. Relación del contenido de asfalto con el flujo del diseño de mezcla convencional. Fuente: Informe INF. 2861-2016 CACISA

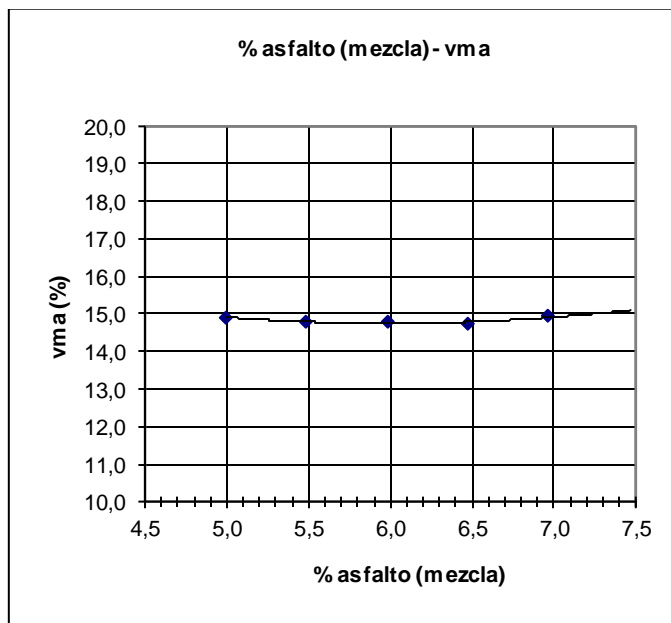


Figura 11. Relación del contenido de asfalto con los vacíos de agregado mineral de la mezcla asfáltica convencional. Fuente: Informe INF. 2861-2016 CACISA

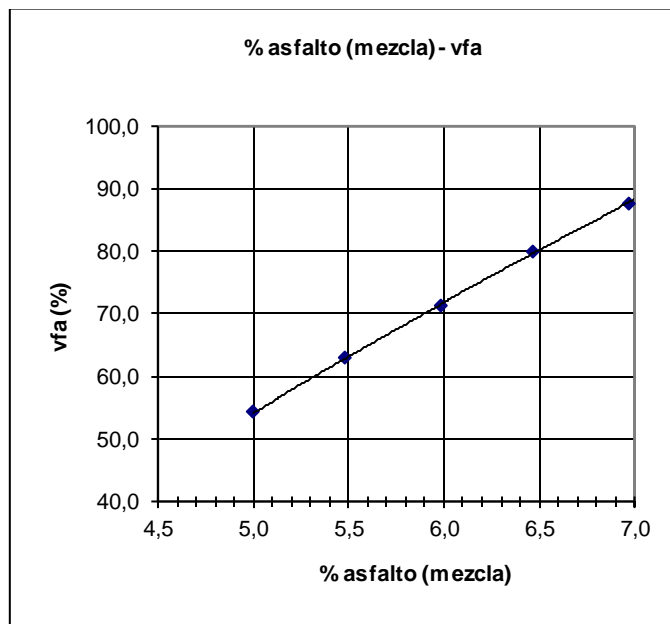


Figura 12. Relación del contenido de asfalto con los vacíos llenos de asfalto de la mezcla asfáltica convencional. Fuente: Informe INF.2861-2016 CACISA

El manual de especificaciones CR-2010 establece que el contenido de vacíos de las pastillas Marshall debe contener un porcentaje de vacíos de $4,0 \pm 1,0\%$ para superficies de ruedo, según el gráfico de la figura 8, el porcentaje óptimo de asfalto para un 4% de vacíos es de 6,10% de cemento asfáltico sobre el total de la mezcla, a partir de esto se revisan los siguientes puntos:

- Estabilidad: debe ser mayor a 800 kg, el gráfico de la figura 9 muestra que con un 6,10% de asfalto sobre la mezcla, alcanza una estabilidad de 1680 kg aproximadamente, superando con creces el mínimo establecido en el CR-2010.
- Flujo: la especificación indica que debe estar entre las 27 y 35 centésimas de centímetro y en el gráfico de la figura 10 se observa que se obtiene un flujo de 33,1 centésimas de centímetro aproximadamente para un porcentaje de asfalto sobre la mezcla de 6,10%, lo cual cumple con la especificación.
- Contenido de vacíos en el agregado mineral (VMA): el porcentaje mínimo de VMA para un tamaño máximo nominal de 12,5 mm debe ser mayor a

14% según indica el CR-2010, y en el gráfico de la figura 11 se puede determinar que todos los diseños de mezcla superan el mínimo establecido; por lo tanto, el porcentaje óptimo del diseño de mezcla convencional cumple con la especificación.

- Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA): la especificación del CR-2010 indica que, para un tránsito superior a los 3 millones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas, el VFA debe de estar entre el 65% y 75%; en la gráfica de la figura 12 se puede determinar que para un 6,10% de asfalto sobre la mezcla el porcentaje de VFA es de un 73% aproximadamente, cumpliendo satisfactoriamente con la especificación.

4.4.2 Diseño de mezcla asfáltica con inclusión de plástico tipo PE de baja densidad

En la tabla 9 se pueden ver los resultados de todos los especímenes para las pruebas del método de diseño Marshall.

Además, en la tabla 10 se puede observar el resumen de las propiedades Marshall para el diseño de mezcla convencional.

Tabla 9. Diseño de mezcla asfáltica con inclusión de plástico, propiedades Marshall.

RESULTADOS DE ANÁLISIS MARSHALL												
% Asfalto sobre la mezcla	# Pastilla	Masa Seca (g)	Masa Superf. Sat. Seca	Masa Sumerg. (g)	Volumen (cm ³)	Gravedad Específica Bruta* (AASHTO 166)	Gravedad Máxima Teórica (AASHTO T 209)	% Vacíos (AASHTO T 269)	Estabilidad (kg)	Flujo (1/100 cm)	VMA	VFA
									AASHTO T 245			
4,90	1	1150,2	1156,5	656,0	500,5	2,298	2,504	8,2	1427,9	25,1	15,5	47,0
	2	1149,9	1153,4	657,5	495,9	2,319	2,504	7,4	1505,9	35,5	14,8	49,9
	3	1148,6	1152,9	651,8	501,1	2,292	2,504	8,5	1534,0	35,1	15,7	46,3
					Promedio	2,303	2,504	8,0	1489	31,9	15,3	47,7
5,36	4	1154,8	1158,8	659,4	499,4	2,312	2,476	6,6	1717	31,9	15,4	57,1
	5	1151,7	1154,8	654,0	500,8	2,300	2,476	7,1	1688	35,2	15,9	55,2
	6	1153,7	1157,5	658,4	499,1	2,312	2,476	6,6	1615	31,0	15,4	57,0

					Promedio	2,308	2,476	6,8	1673	32,7	15,6	56,4
5,82	7	1155,2	1157,2	659,5	497,7	2,321	2,456	5,5	1638	28,0	15,5	64,4
	8	1153,5	1154,5	661,3	493,2	2,339	2,456	4,8	1773	39,9	14,8	67,7
	9	1154,0	1155,7	657,9	497,8	2,318	2,456	5,6	1723	29,6	15,6	63,9
					Promedio	2,326	2,456	5,3	1711	32,5	15,3	65,4
6,27	10	1159,7	1160,7	665,5	495,2	2,342	2,437	3,9	1892	31,4	15,1	74,3
	11	1162,2	1162,9	667,2	495,7	2,345	2,437	3,8	1876	50,7	15,0	74,8
	12	1162,3	1163,3	669,1	494,2	2,352	2,437	3,5	1785	32,8	14,8	76,4
					Promedio	2,346	2,437	3,7	1851	38,3	15,0	75,2
6,72	13	1160,9	1161,7	670,3	491,4	2,362	2,434	2,9	1809	31,2	14,8	80,1
	14	1160,0	1160,6	671,1	489,5	2,370	2,434	2,6	1848	39,4	14,5	81,8
	15	1164,1	1165,3	670,9	494,4	2,355	2,434	3,3	1807	41,5	15,1	78,3
					Promedio	2,362	2,434	2,9	1821	37,4	14,8	80,1

Tabla 10. Tabla resumen de propiedades Marshall para la mezcla con plástico incluido.

TABLA RESUMEN DE RESULTADOS							
CONTENIDO BITUMEN (%) MEZCLA	CONTENIDO BITUMEN (%) AGREGADO	DENSIDAD (Kg/m³)	ESTABILIDAD (kg)	FLUJO (cm/100)	VACÍOS (%)	V.M.A. (%)	VFA (%)
4,90	5,00	2,303	1489	31,9	8,03	15,3	47,7
5,36	5,50	2,308	1673	32,7	6,79	15,6	56,4
5,82	6,00	2,326	1711	32,5	5,31	15,3	65,4
6,27	6,50	2,346	1851	38,3	3,72	15,0	75,2
6,72	7,00	2,362	1821	37,4	2,95	14,8	80,1

Para un mejor estudio de datos y así determinar el diseño de mezcla que cumpla con las especificaciones del CR-2010, en las figuras 13, 14, 15, 16, 17 y 18 se

encuentran graficadas las propiedades Marshall en relación con la cantidad bitumen sobre la mezcla en total.

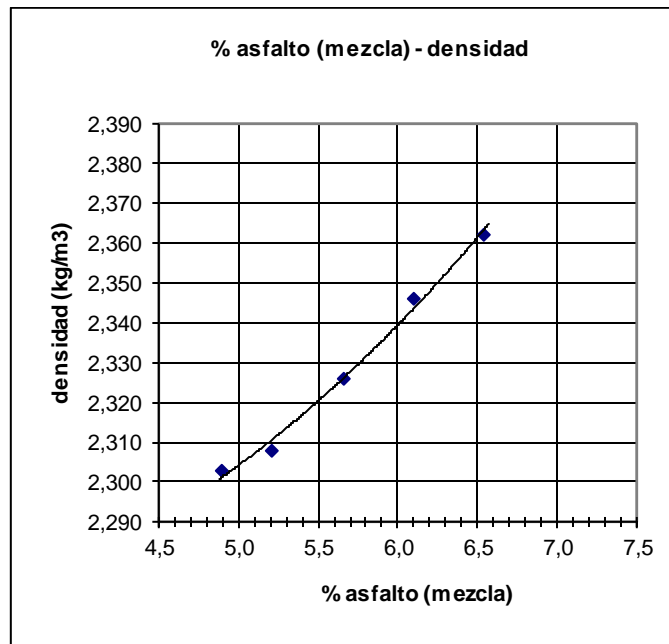


Figura 13. Relación del contenido de asfalto con la densidad de la mezcla asfáltica con inclusión de plástico.

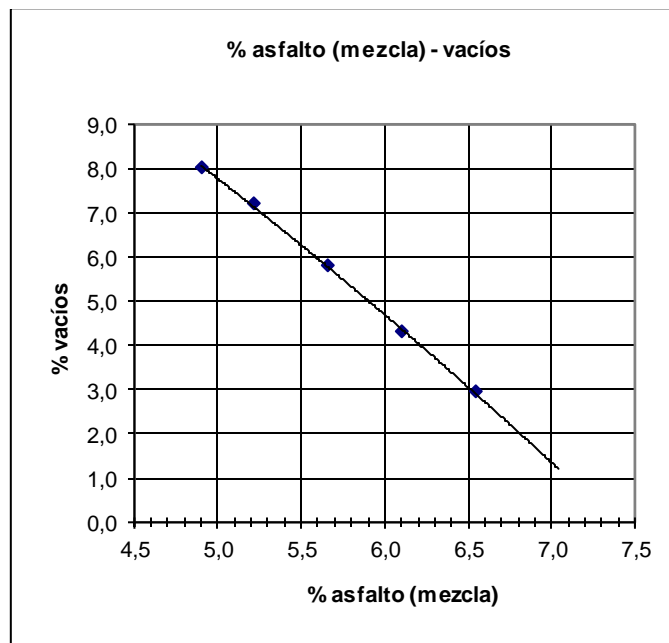


Figura 14. Relación del contenido de asfalto con el contenido de vacíos de la mezcla asfáltica con inclusión de plástico.

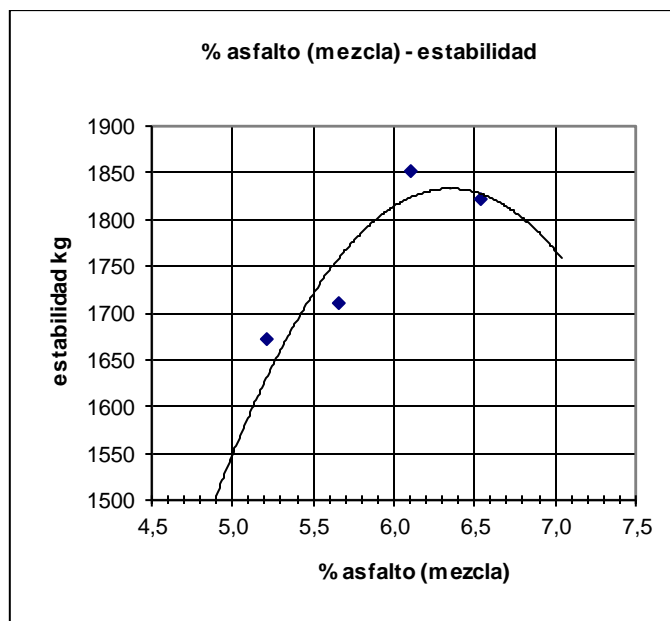


Figura 15. Relación del contenido de asfalto con la estabilidad de la mezcla asfáltica con inclusión de plástico.

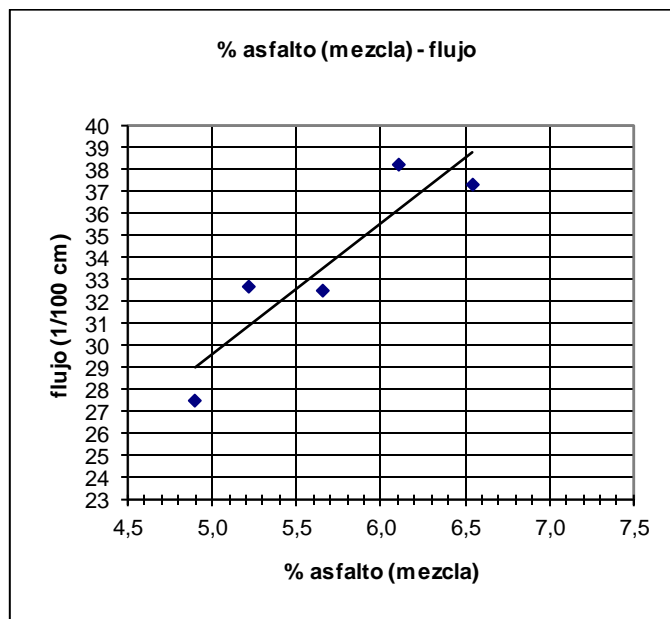


Figura 16. Relación del contenido de asfalto con el flujo de la mezcla asfáltica con inclusión de plástico.

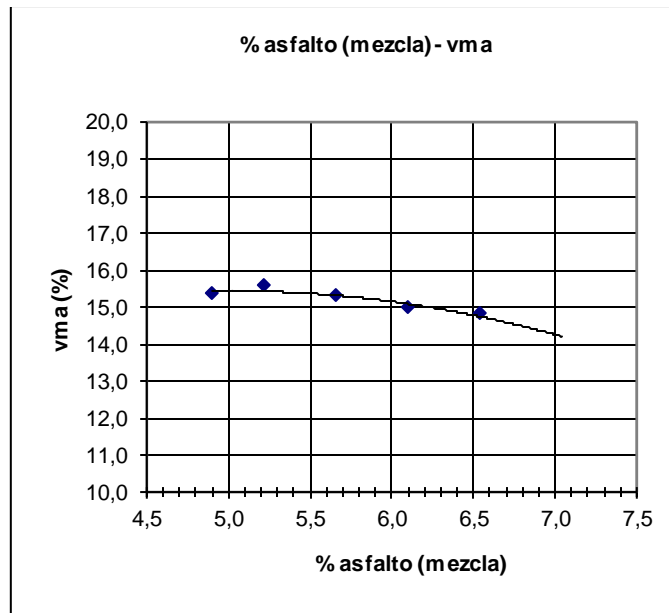


Figura 17. Relación del contenido de asfalto con los vacíos del agregado mineral de la mezcla asfáltica con inclusión de plástico.

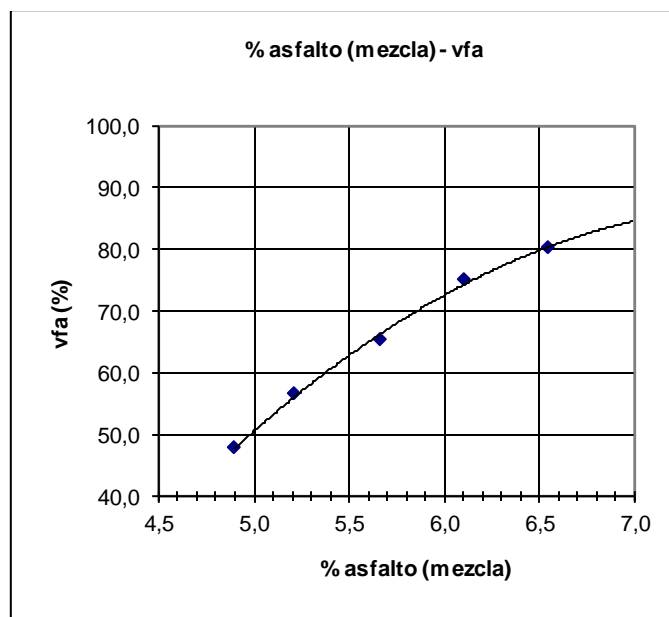


Figura 18. Relación del contenido de asfalto con los vacíos llenos de asfalto de la mezcla asfáltica con inclusión de plástico.

El manual de especificaciones CR-2010 establece que el contenido de vacíos de las pastillas Marshall debe contener un porcentaje de vacíos de $4,0 \pm 1,0\%$ para

superficies de ruedo, según el gráfico de la figura 14, el porcentaje óptimo de asfalto para un 4% de vacíos, es de 6,20% de cemento asfáltico sobre el total de la mezcla, a partir de esto se revisan los siguientes puntos:

- Estabilidad: debe ser mayor a 800 kg, el gráfico de la figura 15 muestra que con un 6,20% de asfalto sobre la mezcla alcanza una estabilidad de 1825 kg aproximadamente, superando con creces el mínimo establecido en el CR-2010.
- Flujo: la especificación indica que debe estar entre las 27 y 35 centésimas de centímetro, y en el gráfico de la figura 16 se observa que se obtiene un flujo de 36,6 centésimas de centímetro aproximadamente para un porcentaje de asfalto sobre la mezcla de 6,20%, la cual no cumple con la especificación y sobrepasa en aproximadamente 1,6 centésimas de centímetro, esto puede ser debido a la plasticidad que adquiere el cemento asfáltico con la inclusión de plástico, pero otro factor importante en este resultado es la inconsistencia a la tendencia lineal de los puntos de estudio.
- Contenido de vacíos en el agregado mineral (VMA): el porcentaje mínimo de VMA para un tamaño máximo nominal de 12,5 mm debe ser mayor a 14% según indica el CR-2010, y en el gráfico de la figura 17 se puede determinar que el diseño de mezcla con un 6,20% de asfalto sobre la mezcla da como resultado un 15% de VMA.
- Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA): la especificación del CR-2010 indica que, para un tránsito superior a los 3 millones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas, el VMA debe de estar entre el 65% y 75%; en la gráfica de la figura 12 se puede determinar que para un 6,20% de asfalto sobre la mezcla el porcentaje de VMA es de un 75% aproximadamente, cumpliendo con la especificación de manera muy limitada.

4.5 Resistencia la tensión diametral retenida al daño inducido por la humedad AASHTO T 283.

Se moldearon 8 especímenes para cada diseño de mezcla, se dividieron en dos sub grupos, unos en condición seca y otros en condición húmeda.

4.5.1 Resultados de tensión diametral para el diseño de mezcla convencional

En la tabla 11 se encuentran los porcentajes de vacío de cada espécimen, junto a información adicional se puede observar que los porcentajes de vacío están dentro de las especificaciones.

Tabla 11. Datos generales de los especímenes de ensayo para la prueba de tensión diametral de la mezcla de diseño convencional. Fuente: Informe INF. 2861-2016 CACISA

N° Pastilla	Masa seca (g)	Masa sumergida (g)	Masa saturada (g)	Gbs	Volumen (cm ³)	% Vacíos
1	1130,3	645,3	1140,4	2,283	495,1	7,4
2	1131,2	644,9	1140,9	2,281	496,0	7,5
3	1129,6	644,1	1139,7	2,279	495,6	7,5
4	1132,6	647,6	1142,8	2,287	495,2	7,2
5	1130,5	648,3	1143,5	2,283	495,2	7,4
6	1131,6	645,1	1140,7	2,283	495,6	7,4
7	1129,8	647,1	1141,2	2,287	494,1	7,2
8	1129,4	644,9	1139,4	2,284	494,5	7,3

A continuación, en la tabla 12 se encuentra la información de saturación de los especímenes que fueron fallados en condición húmeda, donde la saturación se encuentra entre el rango de 70% a 80%, tal como especifica la norma.

Tabla 12. Porcentaje de saturación de los especímenes del ensayo de tensión diametral para el diseño de mezcla convencional. Fuente: Informe INF. 2861-2016 CACISA

N° Pastilla	Masa seca (g)	Masa saturada (g)	Volumen agua absorbida (cm ³)	Volumen de vacíos (cm ³)	% Saturación
1	1130,3	1156,2	25,9	36,6	70,8
2	1131,2	1157,9	26,7	37,1	72,0
3	1129,6	1157,9	28,3	37,3	75,8
4	1132,6	1158,6	26,0	35,7	72,8

Los resultados de las cargas de falla de cada espécimen para condición saturada se encuentran en la tabla 13 y los resultados para los especímenes en condición seca en la tabla 14.

Tabla 13. Resultados de tensión diametral para los especímenes en condición saturada del diseño de mezcla convencional. Fuente: Informe INF. 2861-2016 CACISA

N° Pastillas saturadas	Volumen (cm ³)	Espesor (cm)	Diámetro (cm)	Carga (kg)	Tensión diametral (kg/cm ²)	Tensión diametral (kPa)
1	495,1	6,40	10,17	1027	10,05	986
2	496,0	6,38	10,17	1034	10,14	995
3	495,6	6,37	10,17	1027	10,09	990
4	495,2	6,39	10,17	1029	10,08	989
Promedio					10,09	990
					Desviación estándar (kPa)	3,8

Tabla 14. Resultados de tensión diametral para los especímenes en condición seca del diseño de mezcla convencional. Fuente: Informe INF. 2861-2016 CACISA

N° Pastillas secas	Volumen (cm ³)	Espesor (cm)	Diámetro (cm)	Carga (kg)	Tensión diametral (kg/cm ²)	Tensión diametral (kPa)
4	495,2	6,39	10,17	1222	11,97	1175
5	495,2	6,38	10,17	1226	12,03	1181
6	495,6	6,40	10,17	1228	12,01	1179
7	494,1	6,40	10,17	1234	12,07	1185
Promedio					12,02	1180
Desviación estándar (kPa)					4,0	

De las tablas 13 y 14 se puede determinar que el promedio de diferencia de tensión diametral entre los especímenes fallados secos y los especímenes fallados saturados fue de 190 kPa, dando como resultado una razón de tensión diametral de un 83,9%, superando el mínimo que especifica el CR-2010 de un 75%.

4.5.2 Resultados de tensión diametral para el diseño de mezcla con inclusión de plástico tipo PE de baja densidad

En la tabla 15 se encuentran los porcentajes de vacío de cada espécimen que se encuentran dentro de lo establecido, además se encuentra información adicional.

Tabla 15. Datos generales de los especímenes de ensayo para la prueba de tensión diametral de la mezcla de diseño con inclusión de plástico tipo Pe de baja densidad.

N° Pastilla	Masa seca (g)	Masa sumergida (g)	Masa saturada (g)	Gbs	Volumen (cm ³)	% Vacíos
1	1135,5	643,4	1145,2	2,263	501,8	7,5
2	1130,1	642,3	1137,6	2,282	495,3	6,7
3	1129,6	640,2	1135,9	2,279	495,7	6,8
4	1130,3	639,1	1138,4	2,264	499,3	7,5
5	1130,4	641,3	1137,9	2,276	496,6	6,9
6	1130,2	640,2	1137,5	2,273	497,3	7,1
7	1131,8	641,8	1139,2	2,275	497,4	7,0

8	1132,6	640,8	1141,6	2,262	500,8	7,5
---	--------	-------	--------	-------	-------	-----

A continuación, en la tabla 16 se encuentra la información de saturación de los especímenes que fueron fallados en condición húmeda, donde la saturación se encuentra entre el rango de 70% a 80%, tal como especifica la norma.

Tabla 16. Porcentaje de saturación de los especímenes del ensayo de tensión diametral para el diseño de mezcla con inclusión de plástico tipo PE de baja densidad.

N° Pastilla	Masa seca (g)	Masa saturada (g)	Volumen agua absorbida (cm ³)	Volumen de vacíos (cm ³)	% saturación
1	1135,5	1162,8	27,3	37,6	72,7
2	1130,1	1154,7	24,6	33,3	73,9
4	1130,3	1157,8	27,5	37,2	73,9
7	1131,8	1157,7	25,9	34,7	74,7

Los resultados de las cargas de falla de cada espécimen para condición saturada se encuentran en la tabla 17 y los resultados para los especímenes en condición seca en la tabla 18.

Tabla 17. Resultados de tensión diametral para los especímenes en condición saturada del diseño de mezcla con inclusión de plástico tipo PE de baja densidad..

N° Pastillas saturadas	Volumen	Espesor (cm)	Diámetro (cm)	Carga (kg)	Tensión diametral (kg/cm ²)	Tensión diametral (kPa)
1	501,8	6,37	10,17	1223	12,02	1180
2	495,3	6,27	10,17	1071	10,69	1049
4	499,3	6,32	10,17	1166	11,55	1134
7	497,4	6,31	10,17	1116	11,07	1087
Promedio					11,33	1112
Desviación estándar						56,5

(kPa)

Tabla 18. Resultados de tensión diametral para los especímenes en condición seca del diseño de mezcla con inclusión de plástico tipo PE de baja densidad.

N° Pastillas secas	Volumen	Espesor (cm)	Diámetro (cm)	Carga (kg)	Tensión diametral (kg/cm²)	Tensión diametral (kPa)
3	495,7	6,23	10,17	1393	14,00	1374
5	496,6	6,33	10,17	1312	12,97	1273
6	497,3	6,30	10,17	1389	13,80	1355
8	500,8	6,29	10,17	1312	13,06	1282
Promedio					13,46	1321
Desviación estándar (kPa)						50,8

De las tablas 17 y 18 se puede determinar que el promedio de diferencia de tensión diametral entre los especímenes fallados secos y los especímenes fallados saturados fue de 209 kPa, dando como resultado una razón de tensión diametral de un 84,2%, superando el mínimo que especifica el CR-2010 que es de un 75%; si se toma en cuenta que la desviación estándar en esta prueba, se dieron valores muy altos en comparación con los valores de desviación estándar de la prueba de tensión diametral del diseño de mezcla convencional, la tensión diametral no varía al haberle incluido plástico tipo PE de baja densidad al diseño de mezcla.

4.6 Resistencia retenida a la compresión uniaxial, AASHTO 165 y AASHTO 167

4.6.1 Resultados de resistencia retenida para el diseño de mezcla convencional

En la tabla 19 se encuentran los porcentajes de vacío de cada espécimen que está dentro de las especificaciones que indican que deben de estar entre 6% y 8% de vacíos, además se presenta información adicional.

Tabla 19. Datos generales de los especímenes de ensayo para la prueba de resistencia retenida de la mezcla de diseño convencional. Fuente: Informe INF. 2861-2016 CACISA

Pastilla	Masa seca (g)	Masa saturada (g)	Masa sumergida (g)	Gbs	% Absorción	Volumen (cm ³)	% Vacíos
1	1831,5	1842,6	1035,5	2,269	0,606	807,1	7,9
2	1830,6	1841,6	1037,9	2,278	0,601	803,7	7,6
3	1832,7	1840,9	1038,4	2,284	0,447	802,5	7,4
4	1830,4	1840,1	1035,7	2,275	0,530	804,4	7,7
5	1829,9	1839,5	1038,6	2,285	0,525	800,9	7,3
6	1832,1	1841,6	1036,7	2,276	0,519	804,9	7,7
7	1832,4	1842,7	1039,5	2,281	0,562	803,2	7,4
8	1831,6	1840,5	1035,1	2,274	0,486	805,4	7,7

Los resultados de las cargas de falla de cada espécimen para condición saturada se encuentra en la tabla 20 y los resultados para los especímenes en condición seca en la tabla 21.

Tabla 20. Resultados de resistencia retenida para los especímenes en condición saturada del diseño de mezcla convencional. Fuente: Informe INF. 2861-2016 CACISA.

Pastillas Saturadas	Carga (kg)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (psi)	Esfuerzo (kPa)
1	2495	10,3	10,17	81,2	30,74	439	3015
2	2485	10,3	10,17	81,2	30,61	437	3003
3	2475	10,3	10,17	81,2	30,48	435	2990
4	2487	10,3	10,17	81,2	30,63	437	3005

Promedio:	30,61	437	3003
Desviación Estándar:	0,10	1,5	10

Tabla 21. Resultados de resistencia retenida para los especímenes en condición seca del diseño de mezcla convencional. Fuente: Informe INF. 2861-2016 CACISA

Pastillas Secas	Carga (Kg)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (psi)	Esfuerzo (kPa)
5	2955	10,3	10,17	81,2	36,39	520	3570
6	2945	10,3	10,17	81,2	36,28	518	3559
7	2928	10,3	10,17	81,2	36,07	515	3538
8	2933	10,3	10,17	81,2	36,13	516	3544
Promedio:					36,21	517	3553
Desviación Estándar:					0,15	2,1	14

De las tablas 20 y 21 se puede determinar que el promedio de diferencia de esfuerzo entre los especímenes fallados secos y los especímenes fallados saturados fue de 550 kPa, dando como resultado una razón de resistencia retenida de un 84,5%, superando el mínimo que especifica el CR-2010 que es de un 75%.

4.6.2 Resultados de resistencia retenida para el diseño de mezcla con inclusión de plástico tipo PE de baja densidad

En la tabla 22 se encuentran los porcentajes de vacío de cada espécimen junto a información adicional.

Tabla 22. Datos generales de los especímenes de ensayo para la prueba de resistencia retenida de la mezcla de diseño con inclusión de bolsa tipo PE de baja densidad.

Pastilla	Masa seca (g)	Masa saturada (g)	Masa sumergida (g)	Gbs	% Absorbido	Volumen (cm ³)	% Vacíos
1	1838,9	1849,7	1035,8	2,259	0,587	813,9	7,6

2	1835,7	1847,6	1033,3	2,254	0,648	814,3	7,8
3	1839,4	1849,9	1035,7	2,259	0,571	814,2	7,6
4	1838,1	1850,1	1035,4	2,256	0,653	814,7	7,8
5	1840,6	1854,4	1038,5	2,256	0,750	815,9	7,8
6	1840,5	1852,3	1036,0	2,255	0,641	816,3	7,8
7	1836,8	1849,2	1036,6	2,260	0,675	812,6	7,6
8	1839,8	1853,4	1038,8	2,259	0,739	814,6	7,7

Los resultados de las cargas de falla de cada espécimen para condición saturada se encuentra en la tabla 23 y los resultados para los especímenes en condición seca en la tabla 24.

Tabla 23. Resultados de resistencia retenida para los especímenes en condición saturada del diseño de mezcla con inclusión de plástico tipo PE de baja densidad. Fuente propia.

Pastillas Saturadas	Carga (kg)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (psi)	Esfuerzo (kPa)
5	2993	10,3	10,17	81,2	36,86	526	3616
6	3095	10,3	10,17	81,2	38,12	544	3740
7	3128	10,3	10,17	81,2	38,53	550	3779
8	3223	10,3	10,17	81,2	39,70	567	3894
Promedio:					38,30	547	3757
Desviación Estándar:					1,17	16,7	115

Tabla 24. Resultados de resistencia retenida para los especímenes en condición seca del diseño de mezcla con inclusión de plástico tipo PE de baja densidad. Fuente propia.

Pastillas secas	Carga (Kg)	Altura (cm)	Diámetro	Área (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (psi)	Esfuerzo (kPa)
1	3433	10,3	10,17	81,2	42,28	604	4148
2	3474	10,3	10,17	81,2	42,79	611	4197
3	3255	10,3	10,17	81,2	40,09	572	3933
4	3483	10,3	10,17	81,2	42,90	613	4208
Promedio:					42,01	600	4122
Desviación Estándar:					1,31	18,7	129

De las tablas 23 y 24 se puede determinar que el promedio de diferencia de resistencia retenida, entre los especímenes fallados secos y los especímenes fallados saturados fue de 365 kPa, dando como resultado una razón

de resistencia retenida de un 91,2%, superando el mínimo que especifica el CR-2010 que es de un 75%; tomando en cuenta que la razón de resistencia retenida del diseño de mezcla convencional es de 84,5%, al haberle incluido plástico esta sí aumenta considerablemente.

5. CONCLUSIONES

1. De acuerdo con el primer objetivo, que dice:

- Determinar el porcentaje óptimo de asfalto para el diseño de mezcla asfáltica densa con bolsa plástica reciclada tipo PE de baja a través del método Marshall de diseño de mezclas descrita en la norma AASTHO T 245.

Se obtuvieron los siguientes porcentajes óptimos de asfalto con las siguientes características descritas en la tabla 25.

Tabla 25. Diseño y características de las mezclas asfálticas. Fuente Propia

	Mezcla asfáltica convencional (Pavicen)	Mezcla asfáltica con inclusión de plástico tipo PE de baja densidad	Especificación	Referencia
Porcentaje óptimo de asfalto	6,10	6,20	-	-
Porcentaje de vacíos	4,00	4,00	4 ± 1	CR-2010
Densidad (kg/m ³)	2351	2348	-	-
Estabilidad (kg)	1675	1825	> 800	CR-2010
Flujo (1/100 cm)	33,1	36,60	27,5 ± 7,5	CR-2010
Porcentaje VMA	14,80	15,00	> 14	CR-2010
Porcentaje VFA	73	75	65 - 75	CR-2010

En la tabla anterior se ve reflejado que, el diseño de mezcla asfáltica con inclusión de plástico reciclado de la industria bananera tipo PE de baja densidad necesita de un ligero aumento de contenido de asfalto para lograr contener un 4% de vacíos. Si bien la característica de flujo, no cumple con la especificación del CR-2010, y al observar la figura 16, la recta de regresión tiene un coeficiente de determinación de 0,8 aproximadamente, es decir, que el

flujo obtenido a partir de la recta de regresión puede variar, de esta manera, es preciso realizar una prueba de estabilidad y flujo a los especímenes Marshall con el porcentaje óptimo, para la mezcla de diseño con inclusión de plástico, y así obtener un dato más real del flujo.

2. De acuerdo con el objetivo que dice:

- Obtener el valor de resistencia a la tensión diametral retenida al daño inducido por la humedad para el diseño de mezcla asfáltica densa con bolsa plástica reciclada tipo PE, de acuerdo con la AASHTO T 283.

Los valores de resistencia a la tensión diametral retenida se pueden observar en el cuadro resumen de la tabla 26.

Tabla 26. Tabla resumen de los valores de tensión diametral para los diseños de mezclas.

	Mezcla asfáltica convencional (Pavicen)	Mezcla asfáltica con inclusión de plástico tipo PE de baja densidad	Especificación	Referencia
Resistencia a la tensión diametral seco (kg/cm ²)	12,02	13,46	-	-
Resistencia a la tensión diametral saturada (kg/cm ²)	10,09	11,33	-	-
Razón de tensión diametral	83,9%	84,2%	> 75%	CR-2010

Como se puede observar en la tabla anterior, los valores de resistencia a tensión diametral de la mezcla con inclusión de plástico son ligeramente más altos que los de la mezcla convencional; sin embargo, la razón de tensión diametral no varía, hay que considerar la desviación estándar en la mezcla con inclusión de plástico dio valores muy altos, por lo tanto, se puede concluir que en cuanto a

esfuerzos a tensión diametral la inclusión de plástico no aporta un aumento considerable.

3. De acuerdo con el siguiente objetivo:

- Obtener el valor resistencia retenida a la compresión uniaxial para el diseño la mezcla asfáltica densa con bolsa plástica tipo PE de baja densidad, a través de las normas AASHTO T 165 y AASHTO T 167.

En el cuadro de la tabla 27 se encuentra un resumen de los valores obtenidos de las pruebas para la resistencia retenida a la compresión uniaxial.

Tabla 27. Tabla resumen de los valores de resistencia retenida a compresión uniaxial.

	Mezcla asfáltica convencional (Pavicen)	Mezcla asfáltica con inclusión de plástico tipo PE de baja densidad	Especificación	Referencia
Resistencia retenida a la compresión uniaxial, seco (kg/cm ²)	36,21	42,01	> 21	CR-2010
Resistencia retenida a la compresión uniaxial, saturada (kg/cm ²)	30,61	38,3	-	-
Razón de resistencia retenida	84,5%	91,2%	> 75%	CR-2010

En la tabla anterior se puede determinar que la inclusión de plástico a la mezcla asfáltica aumenta los valores de resistencia retenida a compresión uniaxial con respecto a una mezcla convencional; además la razón de resistencia retenida también aumenta su valor.

Por tanto, incluir plástico reciclado de la industria bananera tipo PE de baja densidad aporta significativamente a un aumento de los esfuerzos a compresión uniaxial en las mezclas asfálticas.

4. De acuerdo con el siguiente objetivo:

- Evaluar el efecto en la durabilidad que produce el uso de bolsa plástica reciclada tipo PE de baja densidad como modificante o aditivo en una mezcla asfáltica densa.

La durabilidad de una mezcla está correlacionada con la cantidad de vacíos que contenga y la susceptibilidad al agua; por lo tanto, es importante analizar la siguiente lista:

- Densidad: la mezcla con inclusión de plástico presenta una menor densidad que una mezcla convencional, esto se debe a que el plástico que se está utilizando es de baja densidad y le añade más volumen al bitumen sin aportar demasiada masa y no como sucede con el hule de neumático molido que está hecho de un polímero de alta densidad; sin embargo, la diferencia de densidades entre las dos mezclas diseñadas y analizadas en el proyecto es de apenas unos 3 kg/m^3 , aspecto que no marca mucha diferencia.
- Contenido de asfalto: el diseño de mezcla con inclusión de asfalto dio como resultado 0,1% más asfalto con aditivo para poder obtener el porcentaje de vacíos correspondiente al 4% que especifica el método de diseño Marshall; un aumento de contenido asfalto significa un aumento en la durabilidad sin reducir las otras propiedades.
- Vacíos en el agregado mineral (VMA): La cantidad de vacíos en el agregado mineral es mucho mayor en el diseño de mezcla con inclusión de plástico que el diseño de mezcla convencional, dejando mucho mayor espacio para el material bituminoso, tal y como se ve reflejado en el contenido de asfalto; esto quiere decir que las películas de asfalto que

rodean el agregado pétreo son más gruesas y proporcionan una mayor durabilidad.

- Flujo y estabilidad: es importante tomar en cuenta estos datos al mismo tiempo, ya que representan la deformación máxima y la carga máxima que puede soportar justo antes de fallar; en el diseño de mezcla con inclusión de plástico la estabilidad supera por 150 kg al diseño de mezcla convencional. No siempre un valor alto de estabilidad significa mayor durabilidad, dado a que, si no tiene la capacidad de deformarse lo suficiente, lo vuelve muy rígido; sin embargo, la mezcla asfáltica con inclusión de plástico tiene un flujo muy alto también, lo cual es señal de que también posee la suficiente capacidad de formación para no volverlo tan rígido.
- Razón de resistencia a la tensión diametral: la razón de resistencia a la tensión diametral de la mezcla con inclusión de plástico no marcó diferencia con respecto al de la mezcla convencional, siendo el mismo valor y manteniendo la misma susceptibilidad al agua.
- Razón de resistencia retenida a la compresión uniaxial: el valor obtenido en la mezcla con inclusión de plástico dio un resultado muy positivo, aumentando la capacidad de soportar esfuerzos a compresión en forma uniaxial y mejorando la susceptibilidad al agua considerablemente.

La mezcla asfáltica convencional cumple con todas las especificaciones del manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes; sin embargo, incluir plástico reciclado de la industria bananera, que es empleado para la protección de la fruta, aumenta de forma considerable la durabilidad de la mezcla de acuerdo con los datos

obtenidos; además, incluir este tipo material ayuda a preservar el ambiente y reciclar toneladas de plástico desechado.

6. RECOMENDACIONES

De acuerdo con los datos obtenidos, la experiencia en laboratorio y las conclusiones realizadas se determinan las siguientes recomendaciones.

- Se recomienda realizar un ensayo de estabilidad y flujo a especímenes con el porcentaje óptimo de asfalto en la mezcla asfáltica con inclusión de plástico tipo PE de baja densidad, para conocer realmente el valor de flujo, dado a que la línea de regresión obtenida tiene un coeficiente aproximado de 0,8; lo cual significa que los datos de las muestras en la figura 16 están muy dispersos y los valores que representa la gráfica no son los más cercanos a realidad.
- Dado a lo complicado que es incorporar el plástico tipo PE de baja densidad en el cemento asfáltico y homogenizarlo, esto por la textura que el mismo plástico tiene; no se recomienda producir en grandes cantidades esta mezcla hasta no encontrar una manera práctica en la cual el proceso sea ágil y no un inconveniente en la producción masiva.
- Realizar un análisis de costos en función de la durabilidad y rendimiento de una mezcla asfáltica convencional y una mezcla asfáltica con inclusión de plástico tipo PE de baja densidad.

Referencias bibliográficas

- Aguiar , J. & Villegas , E. (2012). *Boletín Técnico PITRA*. Obtenido de www.lanamme.ucr.ac.cr:
http://www.lanamme.ucr.ac.cr/images/boletines/boletin_pitra_24_alternativas_verdes_a_las_modificantes_de_asfalto.pdf
- Arkiplus. (2013). *Historia del pavimento*. Obtenido de <http://www.arkiplus.com/historia-del-pavimento>
- Asphalt Institute. (1982). *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfálticaasfáltica caliente*.
- CACISA. (2016). *INFORME DE ENSAYO INF. 2861-2016*. Santo Domingo, Heredia.
- Claudio, P. (s.f.). *Historia y biografías*. Obtenido de <http://historiaybiografias.com/neolitico/>
- Claudio, P. (s.f.). *Historia y biografías*. Obtenido de http://historiaybiografias.com/curiosidades_28/
- e-asphalt.com. (s.f.). *Hisotoria del asfalto*. Obtenido de http://www.e-asphalt.com/orig_asf/historia_del_asfalto.htm
- Herrera, L. M. (2013, junio 3). Costa Rica usa asfalto no apto para carga vehicular y temperaturas. *La Nacion*.
- LANAMME. (s.f.). *Procedimiento para Determinar la Resistencia a la Tensión Diametral Retenida al daño inducido por la humedad de mezclas bituminosas compactadas*. Obtenido de <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/images/ensayos/8-mezclas/8.29-8.30-8.31-8.32.pdf>
- LANAMME. (s.f.). *Procedimiento para determinar la resistencia a la tensión diametral retenida al daño inducido por la humedad de mezclas bituminosas compactadas*. <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/images/ensayos/8-mezclas/8.29-8.30-8.31-8.32.pdf>

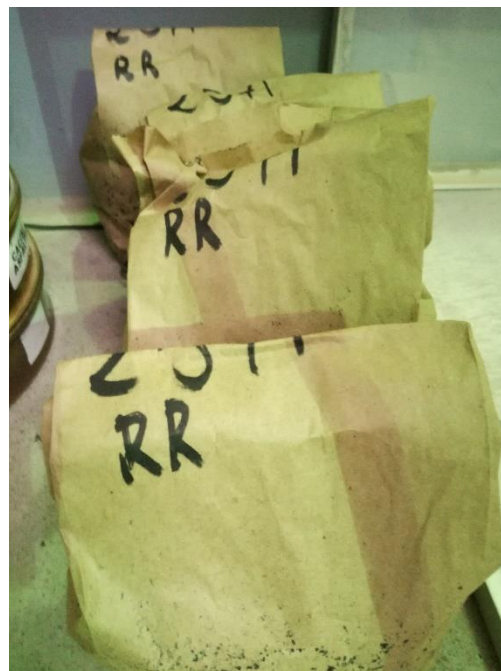
- Maxil, R. y Salinas, M. (2006) *Ventajas y desventajas del uso de polímeros en el asfalto*. Tesis inédita. Licenciatura en Ingeniería civil. Universidad de las Américas Puebla. Puebla, México.
- Padilla, A. (2004). *upc.edu*. Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista: Obtenido de <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3334>
- Schlumberger. (s.f.). *Schlumberger*. Obtenido de www.glossary.oilfield.slb.com: http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/u/uniaxial_compressive_strength.aspx
- Torres, A., Bernal, M. & Castano, E. (2013). *Evaluación ambiental de la práctica "embolsado" en plátano*. Quindío, Colombia: Luna Azul.

ANEXOS

A continuación, se presentan una serie de fotografías de los equipos, materiales, especímenes y pruebas de laboratorio.



1. Agregados pétreos, separados por tamaño.



2. Baches, bolsas de papel con los agregados en los pesos requeridos para cumplir con a granulometría.



3. *Espécimen de diseño Marshall fallado*



4. *Cemento asfáltico con plástico incluido*



5. Mezcla asfáltica con plástico incluido



6. Especímenes para el ensayo de resistencia retenida a la compresión uniaxial.



7. Bomba de vacío para saturar las pastillas de tensión diametral.



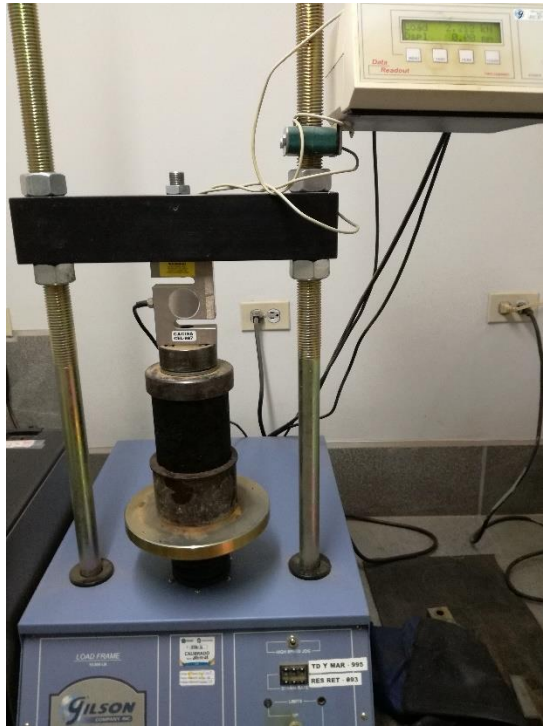
8. Baño de agua para mantener las pastillas saturadas a 60 °C



9. Prensa hidráulica para fallar a tensión diametral.



10. Prensa hidráulica, para moldear los especímenes de resistencia retenida.



11. Prensa hidráulica para fallar los especímenes de resistencia retenida



12. Gato hidráulico para extraer los especímenes de los moldes.



13. Plástico tipo PE de baja densidad, reciclado de la industria bananera.

