UNIVERSIDAD ISAAC NEWTON
SEDE VIRTUAL
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Licenciatura en Ingeniería Civil

REVISIÓN DE LAS TÉCNICAS DE USO DEL PLÁSTICO DE DESECHO COMO ADITIVO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS

TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL

SUSTENTANTES:
MARÍA ABIGAIL BARQUERO BLANCO
BYRON MEJÍAS VARGAS

DIRECTOR DE TESIS:
WILBERHT STIF CARRILLO ROJAS

SEPTIEMBRE, 2025

Nota aclaratoria: [En aras de procurar la sencillez de estilo, este documento no hace distinción de género en la redacción, pero rechaza toda discriminación que por este medio pudiere darse].

Tribunal examinador

Este proyecto profesional fue aprobado por el Tribunal Examinador de la licenciatura de Ingeniería Civil de la Universidad Isaac Newton

_____

Licda. Laura Prenda Castillo

Rectora de la Universidad Isaac Newton

_____

Ing. Wilberth Stif Carrillo Rojas

Tutor

_____

Ing. Lincoln Javier Sánchez Hernández

Lector

Declaración jurada

Universidad Isaac Newton
Escuela de Ingeniería
Licenciatura en Ingeniería Civil

DECLARACIÓN JURADA

Yo María Abigail Barquero Blanco cédula de identidad Nº [redacted] estudiante de la carrera Ingeniería Civil de la Universidad Isaac Newton, declaro bajo fe de juramento y consciente de las responsabilidades de los civiles y penales de este acto, que este Trabajo Final de Investigación es de mi autoría y es presentado con la finalidad de obtener el grado de Licenciatura y tiene como título “Licenciatura en Ingeniería Civil”.

Declaro que en él no se han reproducido informaciones parciales o totales de otros autores, como si fueran de mi propia autoría, por el contrario, se han destacado en el uso de citas textuales las informaciones de otros autores, consignando su origen. Debido a lo anterior, libero a la Universidad Isaac Newton de cualquier responsabilidad en caso de que la declaración sea falsa.

Además, por este medio, autorizo la consulta de esta investigación para fines académicos por parte de la comunidad de usuarios de la Biblioteca de la Universidad Isaac Newton, bajo las modalidades de préstamo interno y a domicilio, así como su inclusión en repositorios o bases de datos digitales que la Universidad considere oportunas.

Entregado en las oficinas de la Dirección Administrativa de la Universidad Isaac Newton ubicada en San Carlos, a los 3 días del mes de setiembre del 2025.

MARIA ABIGAIL BARQUERO BLANCO (FIRMA)

Firmado digitalmente por MARIA ABIGAIL BARQUERO BLANCO (FIRMA)
Fecha: 2025.09.09 20:57:20 -06'00'

María Abigail Barquero Blanco
Cédula: [redacted]

Declaración jurada

Universidad Isaac Newton
Escuela de Ingeniería
Licenciatura en Ingeniería Civil

DECLARACIÓN JURADA

Yo Byron Mejías Vargas cédula de identidad Nº [redacted] estudiante de la carrera Ingeniería Civil de la Universidad Isaac Newton, declaro bajo fe de juramento y consciente de las responsabilidades de los civiles y penales de este acto, que este Trabajo Final de Investigación es de mi autoría y es presentado con la finalidad de obtener el grado de Licenciatura y tiene como título "Licenciatura en Ingeniería Civil".

Declaro que en él no se han reproducido informaciones parciales o totales de otros autores, como si fueran de mi propia autoría, por el contrario, se han destacado en el uso de citas textuales las informaciones de otros autores, consignando su origen. Debido a lo anterior, libero a la Universidad Isaac Newton de cualquier responsabilidad en caso de que la declaración sea falsa.

Además, por este medio, autorizo la consulta de esta investigación para fines académicos por parte de la comunidad de usuarios de la Biblioteca de la Universidad Isaac Newton, bajo las modalidades de préstamo interno y a domicilio, así como su inclusión en repositorios o bases de datos digitales que la Universidad considere oportunas.

Entregado en las oficinas de la Dirección Administrativa de la Universidad Isaac Newton ubicada en San Carlos, a los 3 días del mes de setiembre del 2025.

Byron Mejías V.

Byron Mejías Vargas

Cédula: [redacted]

Carta del Tutor

San José 3 de septiembre del 2025.

Señores
UNIVERSIDAD ISAAC NEWTON
Presente

Estimados señores:

En mi calidad de tutor designado a la Tesis elaborada por los estudiantes María Abigail Barquero Blanco y Byron Mejías Vargas , titulada Revisión de las técnicas de uso del plástico de desecho como aditivo para mezclas asfálticas, durante el período 2025, al respecto hago de su conocimiento que doy mi aprobación para que este Trabajo Final de Graduación, sea desarrollado y presentado ante la Universidad Isaac Newton, contando con los lineamientos establecidos por esta reconocida Universidad.

Agradezco la oportunidad brindada para poder desarrollar junto este estudiante este trabajo que enriquecerá la estructura institucional de esta dependencia.

Sin más por el momento me despido cordialmente,

_____

Ing. Wilberth Stif Carrillo Rojas
Tutor de Tesis
Docente de la Universidad Isaac Newton

Carta de Lector

San José 3 de septiembre del 2025.

Señores
UNIVERSIDAD ISAAC NEWTON
Presente

Estimados señores:

En mi calidad de Lector designado a la Tesis elaborada por los estudiantes María Abigail Barquero Blanco y Byron Mejías Vargas , titulada Revisión de las técnicas de uso del plástico de desecho como aditivo para mezclas asfálticas, durante el período 2025, al respecto hago de su conocimiento que doy mi aprobación para que este Trabajo Final de Graduación, sea desarrollado y presentado ante la Universidad Isaac Newton, contando con los lineamientos establecidos por esta reconocida Universidad.

Agradezco la oportunidad brindada para poder desarrollar junto este estudiante este trabajo que enriquecerá la estructura institucional de esta dependencia.

Sin más por el momento me despido cordialmente,

_____

Ing. Lincoln Javier Sánchez Hernández
Lector de Tesis
Docente de la Universidad Isaac Newton

Dedicatoria

María Abigail Barquero Blanco:

A Dios, por ser mi refugio, fortaleza y guía. Gracias por escuchar mis oraciones y recordarme que cada esfuerzo tiene su recompensa. Todo lo que soy y lo que he logrado se lo debo a Ti.

A mi familia, por su apoyo constante, sus consejos y su confianza en cada etapa de este camino. De manera especial a mi madre, la luz de mi vida, quien con su amor infinito, paciencia y ejemplo me ha enseñado a no rendirme y a creer en mí misma. Este logro también le pertenece, pues sin su respaldo incondicional nada de esto habría sido posible.

Byron Mejías Vargas:

Primeramente, a Dios, por ser la fuente de mi fortaleza, por darme la sabiduría, la perseverancia y la paz necesarias para culminar este camino. Sin Su guía y bendición, este logro no hubiera sido posible.

*Con especial mención de honor a mi madre, **Yamileth Vargas Gamboa**, quien fue mi luz y mi eterna inspiración desde los inicios de la carrera. Aunque descansa en los brazos del Señor, su recuerdo, su amor y su ejemplo permanecieron siempre a mi lado. Fue mi ángel en el cielo, acompañándome en silencio y dándome la motivación necesaria para no rendirme. Este logro está dedicado plenamente a ella, porque sin su presencia en vida y sin la fuerza de su memoria, no hubiera sido posible alcanzar este gran objetivo.*

Tabla de contenidos

Tribunal examinador iii

Declaración jurada iv

Declaración jurada v

Carta del Tutor vi

Carta de Lector vii

Dedicatoria viii

Índice de tablas y figuras xviii

Índice de abreviaturas en orden alfabético xxiii

Capítulo 1: Introducción 1

1.1 Planteamiento del Problema de Investigación 1

1.1.1 Contexto 1

1.1.2 Justificación 1

1.1.3 Problema de Investigación 4

1.1.4 Estado del Arte 5

1.2 Objetivos de la Investigación 7

1.2.1 Objetivo General 7

1.2.2 Objetivos Específicos 7

1.3 Las Variables o Categorías de Análisis 7

1.3.1 Las Variables 7

1.3.1.1 Variable Dependiente. 8

1.3.1.2 Variable Independiente. 8

1.3.1.3 Variable Interviniente. 8

1.3.2 Matriz de la Investigación 9

1.4 Alcances 11

1.4.1 Contribución Al Conocimiento Sobre Materiales Innovadores 11

1.4.2 Avance en la Optimización de Infraestructuras Viales 11

1.4.3 Análisis de Resistencia a la Fatiga y Vida Útil 11

1.4.4 Evaluación Integral de Beneficios Ambientales y de Sostenibilidad 11

1.5 Formulación de la Hipótesis de la Investigación 12

Capítulo 2: Marco Teórico 13

2.1 Estado del Conocimiento 13

2.1.1 Pavimentos 13

2.1.2 Tipos de Pavimentos 14

2.1.2.1 Pavimentos Rígidos. 14

2.1.2.2 Pavimentos Compuesto. 15

2.1.2.3 Pavimentos Flexibles. 16

2.1.3 Tipos de Fallas de Pavimentos Flexibles 16

2.1.3.1 Agrietamiento por Fatiga. 16

2.1.3.2 Ahuellamiento por Deformación Plástica. 17

2.1.3.3 Daño por Humedad. 18

2.1.3.4 Baches. 19

2.1.3.5 Agrietamiento Térmico. 20

2.1.4 Metodología De Diseño De Mezclas Asfálticas En Caliente 21

2.1.5 Metodología de Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente SUPERPAVE® en Costa Rica..... 22

2.1.5.1 Nivel 1. 22

2.1.5.2 Nivel 2. 23

2.1.5.3 Nivel 3. 23

2.1.5.4 Nivel 4. 23

2.1.6 Tipos de Ensayo Usados en la Metodología SUPERPAVE® 25

2.1.6.1 Diseño Volumétrico de Mezcla Asfáltica Utilizando El Método Superpave®..... 25

2.1.6.2 Resistencia Retenida por Tensión Diametral (RRTD). 26

2.1.6.3 Deformación Permanente, Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA)..... 27

2.1.6.4 Ensayo a Flexotracción de Vigas. 28

2.1.6.5 Módulo Dinámico Complejo E*. 29

2.1.6.6 Rueda de Hamburgo..... 31

2.1.7 Metodología de Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente Marshall en Costa Rica 33

2.1.8 Plásticos 34

2.1.9 Clasificación de las Propiedades de los Plásticos..... 36

2.1.9.1 Termoplásticos. 36

2.1.9.2 Termoestables. 36

2.1.10 Clasificación del Comportamiento ante las Cargas de los Plásticos. 37

2.1.10.1 Los Elastómeros..... 37

2.1.11 Tipos de plástico Utilizados en Mezclas Asfálticas 37

2.1.11.1 Tereftalato de Polietileno (PET). 37

2.1.11.2 Polietileno de Alta Densidad (HDPE / PEAD). 37

2.1.11.3 Policloruro de vinilo (PVC). 38

2.1.11.4 Polietileno de baja densidad / plástico Peletizado (LDPE). 38

2.1.11.5 Polipropileno (PP). 39

2.1.11.6 Poliestireno (PS). 39

2.1.11.7 Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS). 39

2.1.11.8 Bumper (Parachoques de Vehículos). 40

2.1.11.9 Resin8 ™ / Agregado de Resina Pre-condicionado (ARP). 40

2.1.12 Economía Circular y Pavimentos Flexibles con Residuos Plásticos..... 40

2.2 Estado de la Cuestión 42

2.2.1 Asfalto y Pavimentos Flexibles Modificado con Tereftalato de Polietileno (PET) 42

2.2.1.1 Incorporación de PET Reciclado por Vía Húmeda en Mezclas Asfálticas en Caliente..... 43

2.2.1.2 Efecto del PET Reciclado en la Estabilidad y Flujo Marshall de Mezclas Asfálticas..... 45

2.2.1.3 Comparación Técnica entre Mezclas Asfálticas Convencionales y Modificadas con Plástico Reciclado PET..... 47

2.2.2 Asfalto y Pavimentos Flexibles Modificado con Polietileno de Alta Densidad (HDPE/PEAD) 50

2.2.2.1 Evaluación del HDPE Reciclado de Bolsas de Banano como Modificador de Asfalto. 50

2.2.3 Asfalto y Pavimentos Flexibles Modificado con Policloruro de Vinilo (PVC) 57

2.2.3.1 Análisis del Comportamiento Mecánico de Mezclas Asfálticas Modificadas con PVC Tipo Blíster Reciclado. 58

2.2.4 Asfalto y Pavimentos Flexibles Modificado con Plástico Peletizado / Polietileno de baja densidad (LDPE)..... 65

2.2.4.1 Evaluación del Comportamiento Mecánico de Mezclas Asfálticas con LDPE Peletizado según el Ensayo Marshall). 65

2.2.5 Asfalto y Pavimentos Flexibles Modificado con Polipropileno (PP), PVC y Bumper de Autos ... 67

2.2.5.1 Impacto del Polipropileno y Bumper Reciclado en el Desempeño de Mezclas Asfálticas .. 67

2.2.5.2 Caracterización y Desempeño del Asfalto Modificado con PVC y PP Provenientes de Billetes. 74

2.2.6 Asfalto y Pavimentos Flexibles Modificado con Resin8 ™ / Agregado de Resina Pre-condicionado (ARP) 84

2.2.6.1 Evaluación del Desempeño de Mezclas Asfálticas Modificadas con Agregado de Resina Pre-condicionado (ARP) a Base de Plástico Reciclado. 85

2.2.6.2 Resultados de Ensayos de Desempeño MAC Modificadas con ARP..... 89

2.2.7 Asfalto y Pavimentos Flexibles Modificado con Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) y con poliestireno (PS) 93

2.2.7.1 Evaluación del Desempeño de Mezclas Asfálticas Modificadas con Residuos Informáticos de ABS y PS. 93

Análisis de Flujo Bajo el Método Marshall para MAC Modificada con PS y ABS. 94

Ensayo de Fatiga para MAC de Patrón y Modificadas con ABS y PS. 97

2.2.8 Impacto Ambiental de Mezclas Asfálticas Modificadas con Plásticos Reciclados 101

2.2.8.1 Análisis Comparativo de Emisiones de CO_2 en Mezclas Asfálticas con PET Virgen y Reciclado 102

2.2.9 Estimación Comparativa de Costos de Producción entre Mezclas Asfálticas Convencionales y Modificadas con Plástico. 103

2.3 Marco Legal 105

2.3.1 Ley N.º 9828 105

2.3.2 Ley N.º 9786 105

Capítulo 3: Marco metodológico 107

3.1. Tipo de investigación 107

3.1.1 Naturaleza de la Investigación (Mixta) 107

3.1.2 Objetivos Cuantitativos 108

3.1.2.1 La identificación de tipos de plásticos. 108

3.1.2.2 El análisis del impacto mecánico. 108

3.1.3 Objetivos Cualitativos 108

3.1.3.1 Analizar el Impacto ambiental. 108

3.1.3.3 Las recomendaciones prácticas. 108

3.1.4 Carácter de la Investigación (Descriptivo y Explicativo) 108

3.2 Sujetos y Fuentes de Información 109

3.2.1 Sujetos de Información 109

3.2.2 Fuentes de Información: Primarias o Secundarias. 110

3.3 Muestra y Población 112

3.3.1 Tipo de Muestra 112

3.3.2 Descripción de la Muestra 113

3.4 Instrumentos y Técnicas de Recolección de Datos 113

3.4.1 Técnicas de Recolección: 113

3.4.1.1 Revisión Bibliográfica 113

3.4.1.2 Análisis de Contenido 113

3.4.2 Instrumentos Utilizados: 113

3.4.2.1 Fichas Bibliográficas y de Contenido. 113

3.4.2.2 Bases de Datos Académicas. 113

3.4.2.3 Videos y Documentales Técnicos 113

3.4.2.4 Comentarios y Foros Especializados 114

3.4.3 Diseño de instrumentos 114

3.4.4 Procedimiento de intervención 115

3.5 Estrategia de Análisis de Datos 115

3.5.1 Presentación y análisis de los datos 115

3.5.2 Cronograma 117

Capítulo 4: Análisis e Interpretación de los Resultados 118

4.1 Presentación de los Resultados para las Variables o Categorías de Análisis 118

4.1.1 Presentación de Identificación de Tipos de Plástico 118

4.1.2 Presentación de Impacto Mecánico / Estabilidad Marshall 120

4.1.3 Presentación de Impacto Mecánico / Flujo Marshall 121

4.1.4 Presentación de Impacto Mecánico / Deformación Permanente metodología Superpave 122

4.1.5 Presentación de Impacto Mecánico / grado de desempeño (PG) metodología Superpave 123

4.1.6 Presentación de Impacto Mecánico / fatiga metodología Superpave 124

4.1.7 Presentación de Impacto Ambiental 125

4.2 Análisis de los resultados para las variables o categorías de análisis 126

4.2.1 Análisis de Identificación de Tipos de Plástico..... 126

4.2.2 Análisis de Impacto Mecánico / Estabilidad Marshall..... 126

4.2.3 Análisis de Impacto Mecánico / Flujo Marshall 127

4.2.4 Análisis de Impacto Mecánico / Deformación Permanente metodología Superpave 128

4.2.5 Análisis de Impacto Mecánico / grado de desempeño (PG) metodología Superpave 129

4.2.6 Análisis de Impacto Mecánico / fatiga metodología Superpave 130

4.2.7 Análisis de Impacto Ambiental 131

4.3 Aceptación o Rechazo de la Hipótesis 132

Capítulo 5: Limitaciones, conclusiones y recomendaciones..... 133

5.1 Limitaciones 133

5.2 Conclusiones 134

5.3 Recomendaciones 136

Referencias 137

Índice de tablas y figuras

Tabla 1 *Matriz cuantitativa* 9

Tabla 2 *Resultados para la mezcla asfáltica convencional y modificada.* 44

Tabla 3 *Resultados para la mezcla asfáltica convencional y modificadas.* 46

Tabla 4 *Resultados para la mezcla asfáltica convencional y modificada* 48

Tabla 6 *Propiedades volumétricas de la Mezcla de control y mezclas asfálticas modificadas con 0.5%, 1% y 1.5% de blíster*..... 59

Tabla 7 *Resultados para la mezcla asfáltica convencional y modificada* 66

Tabla 8 Fuentes de información primarias..... 110

Figura 1 Porcentaje de destino de los desechos sólidos en Costa Rica 2

Figura 2 Estructura Pavimento Rígido 15

Figura 3 *Estructura Pavimento Compuesto* 15

Figura 4 *Estructura Pavimento Flexible* 16

Figura 5 *Falla de agrietamiento por fatiga de una mezcla asfáltica*..... 17

Figura 6 *Falla por deformación permanente de una mezcla asfáltica* 18

Figura 7 *Falla raveling, daño por Humedad de una mezcla asfáltica según su grado* 19

Figura 8 *Baches de una mezcla asfáltica según su grado*..... 20

Figura 9 *Esquema del agrietamiento térmico* 21

Figura 10 *Esquema de niveles de metodología de diseño de mezcla asfáltica SUPERPAVE®* 24

Figura 11 *Compactador Giratorio Superpave® (CGS).* 26

Figura 12 *Equipo para fallar los especímenes secos y acondicionados.*..... 27

Figura 13 *Montaje de especímenes en el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA).*..... 28

Figura 14 *Equipo de flexotracción en vigas* 29

Figura 15 *Montaje del ensayo de Módulo Dinámico* 30

Figura 16 *Ejemplo de Curva Maestra* 31

Figura 17 Rueda de Hamburgo 32

Figura 18 *Parámetros típicos de diseño en la Metodología Marshall definidos en función del tráfico* 34

Figura 19 *Porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral de acuerdo con el contenido de vacíos de diseño en la mezcla asfáltica* 34

Figura 20 Codificación de la Sociedad de Industrias de Plástico (SPI) 36

Figura 21 Modelos de Economía Lineal y Economía Circular 41

Figura 22 Tipo de Mezcla Vs. Estabilidad. 48

Figura 23 *Tipo de mezcla Vs. Flujo* 49

Figura 24 *Tipo de mezcla VS. Índice de rigidez.* 50

Figura 25 *Proceso de incorporación de las bolsas de PET al ligante asfaltico* 51

Figura 26 *Grafica de resultados análisis TGA del PET* 52

Figura 27 Grafica de resultados análisis DSC del PET 53

Figura 28 *Topografía y la rugosidad de muestras del asfalto AC-30 sin modificar y modificado con bolsa de banano.* 54

Figura 29 *Comparación de viscosidades de los asfaltos e indicadores de desempeño definidos por Superpave® para los asfaltos* 55

Figura 30 *Comparación de CREEP repetitivo para diferentes asfaltos sin modificados* 56

Figura 31 *Especificaciones y análisis de resultados según MSCR* 57

Figura 32 *Resultados promedio del ensayo de fatiga a deformación controlada* 60

Figura 33 *Deformación unitaria contra número de repeticiones a la falla* 61

Figura 34 *Curvas maestras de la mezcla control y la mezcla modificada* 62

Figura 35 *Impresión máxima y cantidad de ciclos del punto de inflexión* 63

Figura 36 *Resultados de Resistencia Retenida a la Tensión Diametral* 64

Figura 37 *Clasificación PG Alta e Intermedia del Asfalto Original y Modificado*..... 69

Figura 38 *Resultados MSCR entre ligante asfaltico original vs modificados con PP y Bumper* 70

Figura 39 *Resultados APA para mezcla asfáltica modificada con material de desecho plástico* 71

Figura 40 *Resultados RTD para mezcla asfáltica modificada con material de desecho plástico* 72

Figura 41 *Resultados Análisis Módulo Resiliente a Tensión Diametral para mezcla asfáltica modificada con material de desecho plástico*..... 73

Figura 42 *Comparación de los resultados de FTIR para el asfalto sin modificar y el modificante con pallets de PVC molido* 76

Figura 43 *Comparación de los resultados de FTIR para el asfalto sin modificar y el modificado con PP* ... 77

Figura 44 *Resultados Análisis Termogravimétrico (TGA) del PVC y billetes de PP*..... 78

Figura 45 Resultados Análisis Termogravimétrico (TGA) billetes de PP 79

Figura 46 *AFM del asfalto sin modificar, asfalto con PVC y PP* 80

Figura 47 *Resultados y parámetros de la prueba de fatiga (LAS) MAC original y modificadas con PVC y PP* 82

Figura 48 *Resultados MSCR modificadas con PVC y PP* 82

Figura 49 *Comparación del Grado de desempeño entre el asfalto original y los asfaltos modificados con PVC Y PP*..... 83

Figura 50 Aditivo de Resina Pre-condicionado (ARP) producido a base de plástico de desecho..... 86

Figura 51 Diseño y resultados de control de calidad en MAC con ARP 88

Figura 52 Resultados de resistencia retenida al daño por humedad mediante el ensayo de tracción indirecta de mezclas de control y modificadas con ARP..... 88

Figura 53 Curvas maestras de módulo dinámico MAC control y ARP al 1% 2% y 3% 89

Figura 54 Módulo dinámico MAC control y ARP al 1% 2% y 3%..... 90

Figura 55 Resumen de resultados del ensayo de deformación permanente determinada en la Rueda de Hamburgo para MAC modificadas con ARP 90

Figura 56 Fatiga en viga de 4 puntos a 400 µS y 600µS, 20°C MAC de control y modificadas con ARP 91

Figura 57 *Diseño mecanístico-empírico, fatiga y Deformación de MAC control y modificada con ARP* 92

Figura 58 Flujo vs MAC modificada con Diskettes 95

Figura 59 Flujo vs MAC modificada con Carcasas..... 95

Figura 60 *Resultado de estabilidad y flujo para las formulaciones con 5% de polímero.*..... 96

Figura 61 Porcentaje de Vacíos de las Muestras 97

Figura 62 Ciclos de fractura ensayo de Fatiga 98

Figura 63 Deformaciones ensayo de Fatiga..... 98

Figura 64 Módulos Dinámicos (Ed), desviación estándar (S) y Coeficientes de Variación (Cv) de la prueba 99

Figura 65 Resultados de deformación Creep, 700 N. 99

Figura 66 Resultados de deformación Creep, 4000 N 100

Figura 67 Resumen del diseño a utilizar para producir mezclas asfálticas modificadas con residuos plásticos+ 102

Figura 68 Análisis de costos de producción por materiales de mezcla asfáltica convencional 103

Figura 69 Análisis de costos de producción por materiales de mezcla asfáltica con residuos plásticos. . 104

Figura 70 Presentación de tipos y porcentajes de plásticos empleados en asfaltos y mezclas asfálticas en caliente 119

Figura 71 Presentación de mejora de estabilidad Marshall, mezcla asfáltica control vs mezcla asfáltica modificada 120

Figura 72 Presentación de flujo Marshall, mezcla asfáltica control vs mezcla asfáltica modificada 121

Figura 73 Presentación ante la deformación permanente, mezcla asfáltica control vs mezcla asfáltica modificada 122

Figura 74 Presentación del grado de desempeño (PG), mezcla asfáltica control vs mezcla asfáltica modificada 123

Figura 75 Presentación ante la fatiga de mezcla asfáltica control vs mezcla asfáltica modificada..... 124

Figura 76 Presentación impacto ambiental..... 125

Índice de abreviaturas en orden alfabético

Aab: Porcentaje de absorción.

AMAAC: Asociación Mexicana Del Asfalto, A.C.

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials (Asociación Americana de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte).

cm: Centímetros.

CA: Cemento asfáltico.

CEef: Capacidad estructural efectiva del pavimento.

D: Diámetro

e: Módulo elástico

EE: Ejes equivalentes.

EEp: Ejes equivalentes acumulados a la fecha de análisis.

EM: Estabilidad Marshall.

$\boldsymbol{eRI}$: Módulo resiliente de elasticidad instantáneo.

$\boldsymbol{eRT}$: Módulo resiliente de elasticidad total.

MAC: Mezcla asfáltica en caliente.

IRI: Índice de rugosidad internacional.

IRS: Índice de resistencia conservada.

ITS: Resistencia a la tracción Indirecta.

J: Joule (julios).

Kg: Kilogramo.

Kpa: Kilo Pascales.

m: Metros.

m2: Metros cuadrados.

m3: Metros cúbicos.

MEPDG: Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (Guía Mecánica-Empírica de Diseño de Pavimentos).

mm: Milímetros.

Mpa: Mega Pascales.

Mr: Módulo resiliente.

P: Carga máxima aplicada.

PSI: (Índice de serviciabilidad).

Pf: Índice de serviciabilidad.

R: Deflexión representativa.

SBS: Polímero (estireno-butadieno-estireno).

ST: Resistencia a la tracción.

TAI: The Asphalt Institute (Instituto de Asfalto).

TSR: Resistencia a la tracción retenida.

v: Coeficiente de Poisson.

R: Vida útil remanente.

$\boldsymbol{vRI}$: Coeficiente de Poisson instantáneo.

$\boldsymbol{vRT}$: Coeficiente de Poisson total.

°C: Grados Celsius.

ºF: Grados Fahrenheit.

Capítulo 1: Introducción

1.1 Planteamiento del Problema de Investigación

1.1.1 Contexto

La infraestructura vial desempeña un papel fundamental en el desarrollo económico y social de un país. En Costa Rica, donde la red de carreteras es esencial para la conectividad regional y nacional, la calidad y durabilidad de los pavimentos son factores críticos. La implementación de nuevas tecnologías y materiales reciclables en la construcción de pavimentos es crucial para garantizar la eficiencia, sostenibilidad y rentabilidad a largo plazo de estas infraestructuras.

"La mejora en las propiedades mecánicas en los pavimentos se consigue con la incorporación de agentes modificadores que, al interactuar en la mezcla asfáltica, proporcionan un aumento en el desempeño mecánico de éstas" (Calabi, Mardones, Sánchez & Valdés, 2019, p.16).

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo principal evaluar el potencial del plástico reciclado como aditivo en mezclas asfálticas para mejorar sus propiedades y sostenibilidad, como comenta (Calabi et al; 2019):

> Los avances tecnológicos y la disminución de recursos han obligado a optar por materiales más innovadores, con buenas prestaciones mecánicas y con buena afinidad con las mezclas asfálticas, como lo es el uso de fibras sintéticas y/o naturales las cuales han demostrado tener la capacidad de proveer de una mayor durabilidad a los pavimentos (p.16).

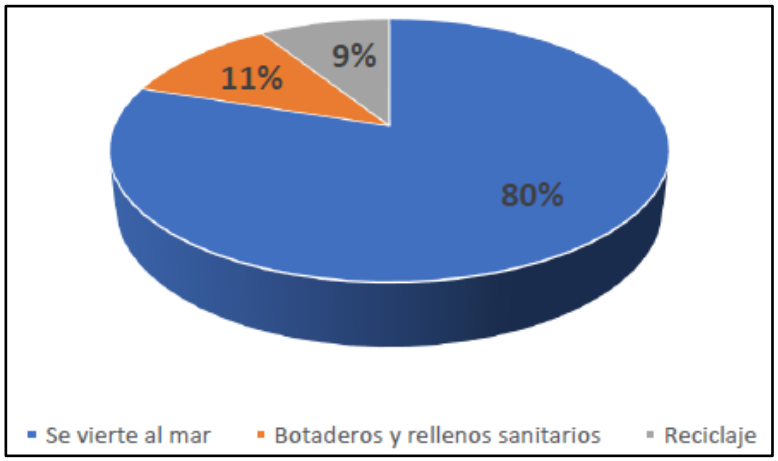
1.1.2 Justificación

Costa Rica, aunque territorialmente pequeña, se destaca por albergar aproximadamente el 5% de la biodiversidad mundial. No obstante, esta reputación ambiental positiva contrasta con su problemática gestión de residuos plásticos. Según el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), la industria del plástico es la tercera más grande del país, y a pesar de los esfuerzos en materia ambiental,

diariamente se desechan cerca de 550 toneladas de plástico, de las cuales el 80% termina en el mar, solo el 9% se recicla y el resto se dispersa en botaderos o en el ambiente (Grajales, 2018).

Figura 1

Porcentaje de destino de los desechos sólidos en Costa Rica



Nota. (Villegas, 2021, p.6).

Adicionalmente, Costa Rica ostenta el título de mayor importador de plástico de toda Centroamérica, lo que agrava la magnitud del problema. Esta situación es aún más preocupante considerando que no existe una certeza científica sobre el tiempo que tarda el plástico en degradarse, “lo más problemático es que nadie realmente sabe cuánto dura una bolsa de plástico en desintegrarse”, pues las estimaciones actuales, que oscilan entre 400 y 1.000 años, no se basan en experimentos concluyentes (Grajales, 2018).

El impacto no se limita al contexto local. Según la ONU, para el año 2050 podrían existir hasta 12 mil millones de toneladas de residuos plásticos acumulados en vertederos y océanos, y se estima que habrá más plástico que peces en el mar, Además, se calcula que “cinco billones de bolsas plásticas se utilizan cada año y un millón de botellas son compradas por minuto”, lo que genera una presión insostenible sobre los ecosistemas marinos (Grajales, 2018).

En el ámbito nacional, el deterioro ambiental es evidente en zonas como la cuenca del río Grande de Tárcoles, considerada la más contaminada de Centroamérica. Según el Informe del Estado de la Nación,

este río recibe toneladas de residuos sólidos cada día, afectando gravemente las playas de su desembocadura como Guacalillo y Tárcoles (Grajales, 2018).

El crecimiento acelerado de la generación de residuos plásticos y el deterioro de la infraestructura vial representan dos de los desafíos más apremiantes en el ámbito ambiental y de la ingeniería civil. En Costa Rica, donde la red vial es un elemento clave para el desarrollo económico y social, la búsqueda de soluciones innovadoras y sostenibles en la construcción de carreteras es fundamental.

El uso de plástico reciclado como aditivo en mezclas asfálticas ofrece una alternativa con el potencial de abordar simultáneamente estos desafíos. Por un lado, permite reducir la acumulación de desechos plásticos, promoviendo una gestión más eficiente de estos residuos y contribuyendo a la economía circular. Por otro lado, estudios bajo el método de diseño de pavimentos flexibles Marshall y Superpave, han demostrado que la incorporación de ciertos plásticos en las mezclas asfálticas puede mejorar la resistencia, durabilidad y desempeño de los pavimentos, lo que se traduce en una mayor vida útil de las carreteras y una reducción en los costos de mantenimiento.

Dado el interés creciente en el desarrollo de infraestructuras sostenibles, es crucial realizar una revisión detallada de las técnicas existentes para integrar el plástico reciclado en pavimentos asfálticos. La presente investigación busca evaluar el potencial de esta práctica mediante tres ejes clave:

Identificar plásticos aptos para uso en asfalto, lo cual es fundamental para garantizar la viabilidad técnica y evitar fallos en la mezcla.

Analizar el impacto mecánico y ambiental, proporcionando datos científicos sobre la eficacia de las mezclas en contextos reales y evaluando el uso de pavimentos sostenibles.

Proponer recomendaciones prácticas, adaptadas a las capacidades técnicas, normativas y logísticas de Costa Rica, para facilitar la adopción de esta tecnología.

Los resultados de este estudio pueden servir como base para futuras investigaciones, así como para la toma de decisiones en el sector de la construcción vial. Además, pueden contribuir al diseño de

políticas públicas orientadas a la sostenibilidad y a la reducción del impacto ambiental de la industria de la infraestructura.

En este contexto, la presente investigación se inscribe dentro del paradigma de la economía circular, ya que, conforme a lo señalado por Villegas (2021) esta constituye una respuesta al cambio de perspectiva en los ámbitos científico, empresarial y político, motivado por la necesidad de implementar estrategias que posibiliten la sostenibilidad ambiental sin descuidar los desafíos sociales y económicos contemporáneos. La economía circular se caracteriza por ser un modelo restaurativo y regenerativo en su concepción, orientado a preservar los productos, componentes y materiales en su mayor nivel de utilidad durante el mayor tiempo posible (p. 3).

1.1.3 Problema de Investigación

El uso de plásticos reciclados como aditivos en mezclas asfálticas representa una alternativa innovadora para mejorar las propiedades del pavimento y fomentar la sostenibilidad en la infraestructura vial. Sin embargo, la implementación de esta tecnología implica una serie de desafíos técnicos y ambientales que requieren un análisis detallado para evaluar su viabilidad y eficacia en comparación con los materiales convencionales.

Desde el punto de vista práctico, la incorporación de plásticos reciclados en el asfalto podría mejorar propiedades clave como la resistencia a la fatiga, aumentar la flexibilidad y reducir la formación de grietas y deformaciones. No obstante, es necesario identificar qué tipos de plásticos son más adecuados para su uso en mezclas asfálticas, también, el procesamiento óptimo del material (trituración, limpieza y dosificación) para garantizar homogeneidad en la mezcla y determinar en qué condiciones pueden ofrecer los mayores beneficios.

El análisis del impacto ambiental también, es un factor fundamental. Si bien el uso de plástico reciclado en pavimentos contribuye a la reducción de residuos y la contaminación por plásticos, es

importante evaluar el comportamiento de estos materiales en el tiempo, su degradación y posibles efectos secundarios, como la liberación de microplásticos.

A partir de lo anterior, se llega a la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es el potencial del plástico reciclado como aditivo en mezclas asfálticas considerando su desempeño mecánico y su impacto ambiental?

1.1.4 Estado del Arte

La evaluación de pavimentos con plásticos reciclados ha sido un tema de interés constante en el ámbito de la ingeniería civil y la construcción de infraestructuras viales. El desarrollo de tecnologías y materiales innovadores ha llevado a la introducción de aditivos, como el plástico, con el objetivo de mejorar las propiedades mecánicas y la durabilidad de los pavimentos flexibles con un enfoque ecológico.

En los últimos años, se ha observado un creciente interés en la aplicación de aditivos plásticos en pavimentos flexibles como una alternativa para abordar desafíos específicos relacionados con la resistencia a la fatiga, la fisuración y la capacidad de carga. Los aditivos de plásticos reciclados, al ser incorporadas en la mezcla asfáltica, tienen la capacidad de modificar las características del pavimento, mejorando su comportamiento frente a cargas repetitivas y condiciones ambientales adversas.

Investigaciones previas han demostrado resultados prometedores en términos de aumento de la resistencia a la fisuración por fatiga, reducción de deformaciones permanentes y mejora en la vida útil de los pavimentos flexibles gracias a la inclusión de aditivos plásticos.

Según Silvestre (2017) en su tesis titulada: “Comparación técnica y económica entre las mezclas asfálticas tradicionales y reforzadas con plástico reciclado en la ciudad de lima-2017”, se realizaron ensayos utilizando la modificación en seco de la mezcla asfáltica, en los cuales se sustituyó el 1% del agregado fino por plástico reciclado. A través de pruebas Marshall en muestras con diferentes porcentajes (0.5%, 1% y 1.5%), se comprobó que el 1% de aditivo plástico es la cantidad óptima para mejorar las propiedades físicas y estructurales del pavimento. Además, se evidenció que la incorporación de plástico incrementa la

resistencia a la deformación en un 3.11% y la capacidad para soportar cargas en un 4.49% en comparación con la mezcla tradicional, lo que indica una mejora en su desempeño estructural (p.90).

En el año 2020 López, evaluó para su propuesta de trabajo de grado titulada: "Comportamiento de una mezcla asfáltica modificada con polímeros provenientes de botellas PET recicladas" que el uso de material polimérico en mezclas asfálticas no afecta su trabajabilidad ni homogeneidad, salvo cuando el contenido de asfalto se reduce en más de un 1% del diseño óptimo. Se determinó que al incorporar un 2% de PET, es posible disminuir el contenido de asfalto en 0.5% sin afectar su desempeño, lo que podría reducir costos y la huella de carbono. Además, la mezcla asfáltica modificada redujo el peso volumétrico hasta en un 23% debido al aumento de vacíos. Finalmente, la adición de PET mejoró la estabilidad en un 5% sin afectar el flujo, manteniendo características similares a las mezclas convencionales (pp. 48-49).

Según Flores (2020) en su tesis de investigación titulada "Influencia de los residuos plásticos reciclados al añadirlos a una mezcla asfáltica modificada en caliente, Trujillo" a partir del estudio realizado se determina que el diseño de mezclas asfálticas en caliente permite establecer el porcentaje óptimo de cemento asfáltico, proceso que se llevó a cabo siguiendo las normas AASHTO, MTC, 410.A PROVIAS y el método Marshall. Los resultados obtenidos fueron positivos y evidenciaron la viabilidad de trabajar con mezclas modificadas mediante la incorporación de residuos plásticos reciclados. Para ello, se elaboraron tres formulaciones de mezclas asfálticas en caliente, en las cuales se sustituyó el agregado fino por porcentajes distintos de residuos plásticos reciclados (5%, 5,5% y 6%). De las 37 muestras evaluadas mediante el ensayo Marshall, se concluyó que la incorporación del 5.5% de residuos plásticos resultó ser la más favorable, alcanzando una estabilidad de 1346 kg, un flujo de 2.65 mm, un peso unitario de 2.304 kg/cm^3, un vacío de aire del 3.5% y un VMA de 13.3% (p.61).

Según Cosio & La Torre (2021) en su tesis de investigación titulada "Mezcla asfáltica en caliente modificada con plástico reciclado para la determinación de sus propiedades mecánicas" se comprobó que

la incorporación de plástico PET reciclado en MAC mejora significativamente sus propiedades mecánicas, alcanzando una estabilidad de 3300 lb frente a 2450 lb en la mezcla convencional y reduciendo el flujo de 17.50 a 12.92 pulg/100. Se decide que la formulación óptima es una combinación de 9% PET y 91% asfalto equivalente a 0,582% de PET y 5,888% de asfalto lo que permite optimizar la densidad a granel a 2,137 g/cm³ y mantener un 18,10% de vacíos en el agregado mineral. Además, la elección de un 5% de plástico, basado en la curva de vacíos al aire, asegura que el asfalto llene correctamente los espacios sin provocar exudación ni agrietamiento, y aunque el costo por metro cúbico de la mezcla modificada es de $72.63 en comparación con los $67.84 de la convencional, esta inversión se compensa a largo plazo con la reducción de los costos de mantenimiento (p.68).

1.2 Objetivos de la Investigación

A continuación, se presenta el objetivo general y los objetivos específicos de la investigación.

1.2.1 Objetivo General

Evaluar el potencial del plástico reciclado como aditivo en mezclas asfálticas para mejorar sus propiedades y sostenibilidad.

1.2.2 Objetivos Específicos

1- Identificar tipos de plásticos aptos para mezclas asfálticas.

2- Analizar el impacto mecánico y ambiental de estas mezclas.

3- Proponer recomendaciones prácticas.

1.3 Las Variables o Categorías de Análisis

1.3.1 Las Variables

Boukidis & Rutberg (2018) definen, que existen dos metodologías investigativas que son investigaciones cuantitativas y cualitativas, cada una de estas investigaciones tiene características propias que se diferencian entre las mismas (p. 209).

Rasinger (2020) menciona que las investigaciones cuantitativas, son más conocidas que las cualitativas, este método es más directo, ya que se encarga de recolectar, analizar e interpretar los datos que se obtienen con la finalidad de responder a las preguntas o corroborar las hipótesis que se plantean. Este tipo de investigaciones se basan en mensuraciones numéricas, contar los datos recolectados y por último emplear la parte estadística para calcular con mayor certeza (p 35).

Por otra parte, Rasinger (2020) menciona, que las investigaciones cualitativas se preocupan por estudiar el entorno de sucesos y se enfocan en todos los hechos reales que suceden con los seres vivos, en la cual se involucran, estiman y realizan experimentos (p. 36).

Después de establecer previamente la naturaleza tanto cuantitativa como cualitativa de la investigación, el actual proyecto de investigación en sus tres objetivos específicos se orientará hacia un enfoque mixto. Esto implica la recopilación de datos, análisis y verificación de en valores números y descriptivos reales que estudian el entorno de sucesos.

1.3.1.1 Variable Dependiente. Desempeño y sostenibilidad de las mezclas asfálticas con plástico reciclado, medido a través de sus propiedades mecánica, durabilidad e impacto ambiental en comparación con mezclas convencionales.

1.3.1.2 Variable Independiente. Incorporación de plástico reciclado en mezclas asfálticas, tipo de plástico reciclado, porcentaje de sustitución del ligante asfáltico por plástico y método de incorporación.

1.3.1.3 Variable Interviniente. Factores externos como las condiciones climáticas, la carga vehicular y los procesos de fabricación y aplicación, los cuales pueden influir en el desempeño del pavimento con plástico reciclado.

1.3.2 Matriz de la Investigación

A continuación, se presentan las matrices de la investigación:

Tabla 1

Matriz cuantitativa

Hipótesis	Conceptos	Variables	Indicadores
Se plantea que el uso de **pavimentos flexibles** con **aditivos de plástico reciclado** tendrá efectos positivos tanto en el **desempeño estructural** como en el **impacto ambienta**l en comparación con los materiales convencionales. Se espera que estas mezclas asfálticas mejoren la **resistencia a la fatiga**, **prolonguen la vida útil** del pavimento y contribuyan a una gestión más eficiente de los **residuos plásticos**. Asimismo, su implementación podría favorecer la **sostenibilidad de la infraestructura vial** al reducir la **huella de carbono** y optimizar el aprovechamiento de materiales reciclados.	**1.Pavimentos flexibles:** Son aquellos construidos con materiales asfálticos y materiales granulares. **2.Aditivos de plástico reciclado:** Son materiales plásticos reutilizados que se incorporan en mezclas asfálticas para modificar y mejorar sus propiedades físicas y mecánicas. **3.Desempeño estructural**: Capacidad de un pavimento para resistir cargas y esfuerzos sin fallas prematuras, asegurando durabilidad y funcionalidad. **4.Impacto ambiental:** Efecto que una actividad o material tiene sobre el medio ambiente, incluyendo la generación de residuos, emisiones de CO_2 y consumo de recursos naturales. **5.Resistencia a la fatiga:** Se refiere a la capacidad de un material para resistir la deformación y el deterioro causados por cargas cíclicas	**1.Resistencia a la fatiga**: Esta variable cuantitativa puede medirse mediante pruebas específicas que evalúen la capacidad del pavimento con aditivos de plástico reciclado para resistir deformaciones y daños bajo cargas repetidas. Los resultados se expresarían en términos de valores numéricos, posiblemente en unidades de estrés o deformación. **2.Vida útil prolongada:** La vida útil del pavimento con plástico reciclado puede medirse cuantitativamente mediante el tiempo estimado en años o el número de ciclos de carga que puede soportar antes de alcanzar un estado crítico. Esta variable proporcionaría un valor numérico que indica la duración proyectada del pavimento. **3.Aditivos de plástico reciclado:** Para medir cuantitativamente los aditivos de plástico reciclado en pavimentos flexibles, se emplean	**Resistencia a la fatiga**: 1.Indice de resistencia cíclica. 2.Deformacion elástica. 3.Módulo Resiliente. 4.Módulo de resilencia a la tracción indirecta. 5.Modulo dinámico. 6.Índice de estabilidad Marshall **Vida útil prolongada:** 1.Índice de Condición del Pavimento. 2.Índice de Desempeño de Pavimentos. 3.Curva de deterioro de un pavimento. 4.Modelación de ESAL´S. 5.Método Mecánico-Empírico. **Aditivos de plástico reciclado:** 1.Porcentaje de plástico reciclado en la mezcla asfáltica. 2.Homogeneidad y distribución del aditivo en la mezcla. 3.Viscocidad de la mezcla. 4.Porcentaje de vacíos en la mezcla. 5.Tipos de plásticos aptos para el uso de pavimentos. **Impacto ambiental:** 1.Cantidad de plástico

	o repetitivas. **6.Vida útil prolongada:** hace referencia al período extendido durante el cual un producto o material conserva sus propiedades y funciones originales sin experimentar un deterioro significativo. **7.Residuos plásticos:** Desechos derivados de materiales plásticos descartados tras su uso, que pueden generar contaminación ambiental si no se gestionan adecuadamente **8.Sostenibilidad de la infraestructura vial**: Capacidad de las carreteras y pavimentos para operar de manera eficiente y duradera, minimizando el impacto ambiental y optimizando el uso de recursos a lo largo de su vida útil. **9. Huella de carbono:** Cantidad total de emisiones de gases de efecto invernadero, expresada en toneladas de CO_2 equivalente, generada directa o indirectamente por una actividad, producto o servicio.	métodos de pesaje y proporción en la mezcla asfáltica, expresando el contenido de plástico como un porcentaje del agregado fino o del ligante asfáltico. **4.Impacto ambiental:** Para medir cuantitativamente el impacto ambiental del uso de aditivos de plástico reciclado en pavimentos flexibles, se emplean métodos de análisis de ciclo de vida (ACV) y estudios de emisiones de CO_2. Se cuantifica la reducción en la generación de residuos plásticos y la disminución del uso de asfalto convencional.	reciclado utilizado (kg/m^2). 2.Huella de carbono, emisiones de CO_2 en la producción y aplicación del pavimento ($kg\ CO_2/m^2$). 3. Reducción en el consumo de asfalto convencional. 4.Concentración de microplásticos.

Nota: Elaboración propia (2025).

1.4 Alcances

1.4.1 Contribución Al Conocimiento Sobre Materiales Innovadores

La investigación ampliará el conocimiento existente sobre el uso de materiales innovadores en la construcción de carreteras, enfocándose en el empleo de plástico reciclado como aditivo en mezclas asfálticas. Se generarán datos valiosos sobre la idoneidad y eficacia de este material en comparación con opciones convencionales.

1.4.2 Avance en la Optimización de Infraestructuras Viales

El estudio contribuirá a la optimización de las infraestructuras viales al evaluar las implicaciones prácticas y ambientales del uso de pavimentos flexibles con aditivos de plástico reciclado. Los resultados facilitarán la identificación de soluciones más eficientes y ecológicas, orientadas a mejorar la durabilidad y la sostenibilidad de las carreteras, con un impacto positivo en la reducción de residuos plásticos y la huella ambiental.

1.4.3 Análisis de Resistencia a la Fatiga y Vida Útil

Se proporcionarán conocimientos sobre el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas modificadas con plástico reciclado, en particular en cuanto a su resistencia a la fatiga y la prolongación de su vida útil.

1.4.4 Evaluación Integral de Beneficios Ambientales y de Sostenibilidad

La investigación llevará a cabo una evaluación exhaustiva de los beneficios ambientales asociados al uso de plástico reciclado en pavimentos, considerando aspectos como la reducción de residuos, la mitigación de la huella de carbono y la mejora en el aprovechamiento de recursos. Estos hallazgos podrán orientar políticas y prácticas orientadas hacia la construcción de infraestructuras viales más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente.

1.5 Formulación de la Hipótesis de la Investigación

Se plantea que el uso de pavimentos flexibles con aditivos de plástico reciclado tendrá efectos positivos tanto en el desempeño estructural como en el impacto ambiental en comparación con los materiales convencionales. Se espera que estas mezclas asfálticas mejoren la resistencia a la fatiga, prolonguen la vida útil del pavimento y contribuyan a una gestión más eficiente de los residuos plásticos. Asimismo, su implementación podría favorecer la sostenibilidad de la infraestructura vial al reducir la huella de carbono y optimizar el aprovechamiento de materiales reciclados.

Capítulo 2: Marco Teórico

En las siguiente investigación, se exploran diversos aspectos relacionados con la construcción y el mantenimiento de carreteras y superficies viales. Comienza con una introducción a los pavimentos, abordando su función, importancia y los diversos materiales. Se examinan los diferentes tipos de pavimentos, que incluyen pavimentos flexibles y rígidos, y se analizan sus características, ventajas y limitaciones. Dentro de este contexto, se profundiza en las mezclas asfálticas, detallando sus componentes, propiedades y procesos de producción. Se discuten también los tipos de fallas comunes en los pavimentos, como la fatiga y deformaciones permanentes, se identifican los factores que contribuyen a su ocurrencia. Además, se explora el papel de los plásticos reciclados y sus variantes como aditivos en las mezclas asfálticas, destacando sus beneficios en términos de resistencia a la fatiga y durabilidad. Se revisan los métodos y ensayos utilizados para medir la resistencia de las mezclas asfálticas en caliente, incluyendo pruebas de laboratorio, con el objetivo de proporcionar un marco de referencia sólido para la evaluación del rendimiento de los pavimentos. Finalmente se procede al investigación y revisión literaria de mezclas asfálticas modificadas con residuos plásticos.

2.1 Estado del Conocimiento

2.1.1 Pavimentos

Según Becerril & Miranda (2016) definen los pavimentos como:

> Un pavimento está construido por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados. Estas estructuras estratificadas se apoyan sobre la subrasante de una vía obtenida por el movimiento de tierras en el proceso de exploración y que han de resistir adecuadamente los esfuerzos que las cargas repetidas del tránsito le transmiten durante el periodo para el cual fue diseñada la estructura del pavimento (p. 9).

Para que un pavimento pueda desempeñar eficazmente sus funciones, es necesario que cumpla con ciertos criterios específicos. En ese sentido, Becerril & Miranda (2016) aclaran que los pavimentos deben:

Ser resistente a la acción de las cargas impuestas por el tránsito.

Ser resistente a los agentes del intemperísmo.

Presentar una estructura superficial adaptada a las velocidades previstas de circulación de vehículos, por cuanto ella tiene una decisiva influencia en la seguridad vial. Además, debe ser resistente al desgate producido por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.

Debe presentar una regularidad superficial, tanto transversal como longitudinal, que permitan una adecuada comodidad a los usuarios en función a las longitudes de onda de las deformaciones y de la velocidad de circulación.

Debe ser durable.

Presentar condiciones adecuadas respecto al drenaje.

El ruido de rodadura, en el interior de los vehículos que afectan al usuario, así como en el exterior, que influye en el entorno, debe ser adecuadamente moderado.

Debe poseer el color adecuado para evitar reflejos y deslumbramientos, y ofrecer una adecuada seguridad al tránsito (p. 9).

2.1.2 Tipos de Pavimentos

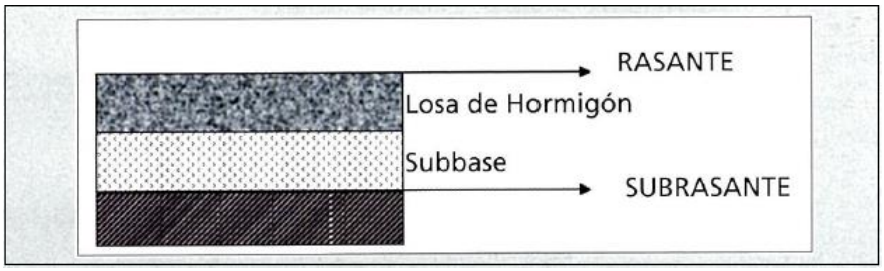
Existen varios tipos de pavimentos utilizados en la construcción de carreteras y otras superficies viales. Entre los más comunes se encuentran los pavimentos rígidos, pavimentos compuestos y los pavimentos flexibles, siendo este último el tipo específico de interés para esta investigación.

2.1.2.1 Pavimentos Rígidos. Según Madrid (2021) son aquellos que están constituidos por una superficie de rodado rígida, normalmente una losa de concreto que puede ser simple o reforzado, instalada sobre una subrasante o sub-base acondicionada técnicamente para soportar la losa.

Debido a la alta rigidez del concreto hidráulico, así como de su elevado coeficiente de elasticidad, absorbe gran parte de los esfuerzos ejercidos sobre el pavimento traspasando bajas tensiones a la sub-base. La capacidad estructural de un pavimento rígido se lo proporciona la resistencia de las losas, por lo que las demás capas que conforman el pavimento ejercen poca influencia en el diseño y espesor del camino (p.21).

Figura 2

Estructura Pavimento Rígido

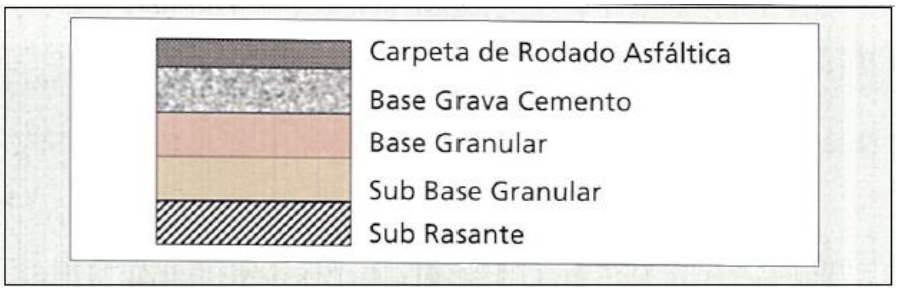


Nota. (Laboratorio Nacional de Vialidad, 2021, p.15).

2.1.2.2 Pavimentos Compuesto. Un pavimento compuesto es aquel en el que se combinan distintos tipos de pavimentos, generalmente, flexibles y rígidos. Regularmente la carpeta flexible es colocada en la superficie como carpeta de rodado y la capa de pavimento rígido está por debajo. Es usual que un pavimento compuesto tenga de capa base una superficie rígida, con la finalidad de corregir o modificar las propiedades mecánicas del suelo existente (Madrid, 2021, p.21).

Figura 3

Estructura Pavimento Compuesto.

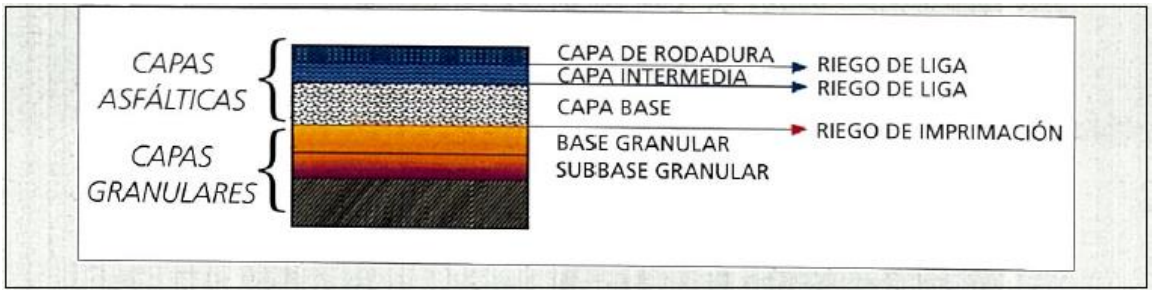


*Nota. (*Laboratorio Nacional de Vialidad, 2021, p.16).

2.1.2.3 Pavimentos Flexibles. Los pavimentos flexibles están formados por una o varias carpetas bituminosas (sistema multicapa), y se denominan flexibles ya que la estructura se deflecta o flexiona dependiendo de las cargas a las cuales es sometido, se apoya generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la sub-base (Madrid, 2021, p.21).

Figura 4

Estructura Pavimento Flexible



Nota. (Laboratorio Nacional de Vialidad, 2021, p.16).

2.1.3 Tipos de Fallas de Pavimentos Flexibles

Los pavimentos flexibles están expuestos a diversos factores que pueden provocar fallas en su estructura y desempeño con el tiempo. Estas fallas pueden clasificarse en diferentes tipos según su origen y efecto sobre la vía. A continuación, se detallan las más comunes en Costa Rica.

2.1.3.1 Agrietamiento por Fatiga. El agrietamiento por fatiga es uno de los principales modos de falla de los pavimentos flexibles. Este tipo de falla generalmente inicia en el extremo inferior de la capa asfáltica debido a la acumulación del daño provocado por las altas deformaciones sufridas bajo la aplicación de cargas repetitivas. La grieta se propaga y eventualmente aparece en la superficie conforme se continúan aplicando las cargas (Aguiar, Leiva, Loría, & Vargas, 2014, p.5).

Figura 5

Falla de agrietamiento por fatiga de una mezcla asfáltica



Nota. (Aguiar, Jiménez, Leiva & Loría 2015, p.27).

2.1.3.2 Ahuellamiento por Deformación Plástica. La deformación permanente, o lo que se conoce como “roderas”, es uno de los principales modos de falla de una estructura de pavimento. La deformación permanente, es la acumulación de pequeñas deformaciones causadas por densificación y/o deformaciones de cortante repetidas bajo la carga de neumáticos. Este tipo de deformación es causada por consolidación, movimiento lateral, o ambos, de la mezcla asfáltica bajo la acción del tránsito. En ambos casos, la deformación aparece como una depresión longitudinal a lo largo de las huellas de los neumáticos en la carretera (Aguiar et al; 2015, p.53).

Figura 6

Falla por deformación permanente de una mezcla asfáltica

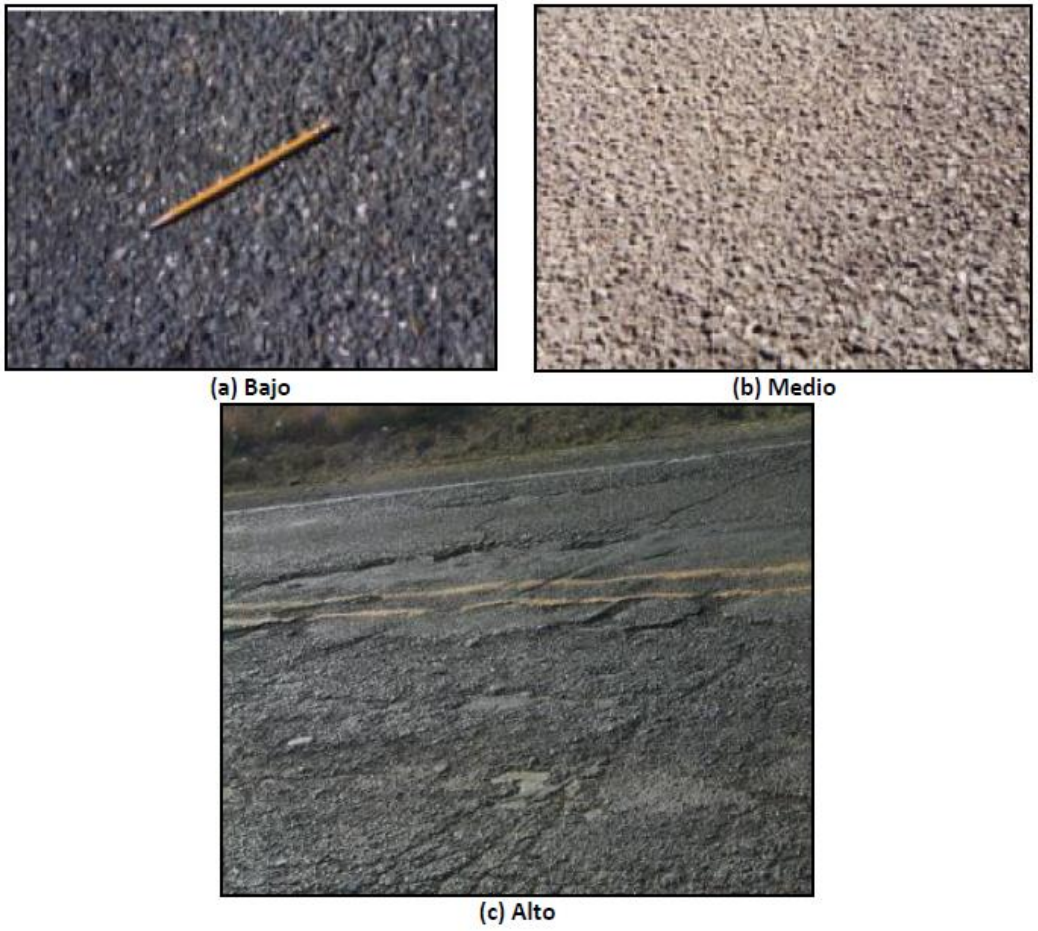


Nota. (Aguiar et al; 2015, p.26).

2.1.3.3 Daño por Humedad. Una de las principales causas del daño prematuro de los pavimentos asfálticos se atribuye a la presencia de agua en la mezcla asfáltica. La manifestación más común del deterioro causado por la presencia del agua al interior de una mezcla en pavimentos flexibles se conoce como stripping o "pérdida del recubrimiento" del asfalto de la superficie de los agregados. El segundo tipo de manifestación más común consiste en el desprendimiento progresivo de los agregados de la superficie de la mezcla causado por el paso de las llantas de los vehículos sobre el material asfáltico (raveling). Estos dos tipos de manifestaciones de daño tienen en común la pérdida de las propiedades de adhesión en la interfase agregado-cemento asfáltico (Aguiar, Miranda, & Loría, 2017, p.6).

Figura 7

Falla raveling, daño por Humedad de una mezcla asfáltica según su grado



Nota. (MAV, 2016, p.66).

2.1.3.4 Baches. Los baches son depresiones en el pavimento con forma de hueco, generalmente con un diámetro inferior a 750 mm, que presentan bordes bien definidos y paredes casi verticales cerca de la superficie. Su aparición puede deberse a la inestabilidad de las capas inferiores o la base del pavimento, espesores inadecuados, fallas constructivas o acumulación de agua en zonas hundidas o agrietadas. Asimismo, el tránsito vehicular contribuye al deterioro al ejercer una acción abrasiva sobre sectores debilitados o con grietas en forma de “cuero de lagarto” que han alcanzado una severidad considerable, lo cual provoca la desintegración del material y la eventual formación del bache (MAV, 2016, p.71).

Figura 8

Baches de una mezcla asfáltica según su grado



Nota. (MAV, 2016, p.72).

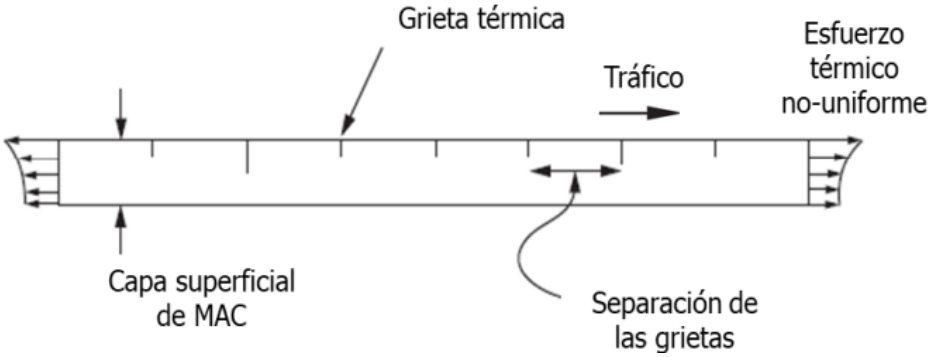
2.1.3.5 Agrietamiento Térmico. El agrietamiento térmico es un tipo de deterioro que se da cuando el pavimento se expone a bajas temperaturas. Usualmente el deterioro por agrietamiento térmico es irreversible y costoso de reparar. El agrietamiento térmico se da cuando las bajas temperaturas (menores a 0 °C) inducen cambios volumétricos en la mezcla asfáltica que generan esfuerzos localizados que superan la resistencia del material.

Los esfuerzos de tensión en la superficie son de mayor magnitud en la dirección longitudinal del pavimento, lo que hace que las grietas por agrietamiento térmico se generen en dirección transversal (perpendiculares a la dirección del tráfico). En la Figura 8 se observa un esquema del

agrietamiento térmico, en donde se destaca la magnitud de los esfuerzos térmicos en la superficie del pavimento y en el inferior de la mezcla asfáltica (Herrera, 2021, p.12).

Figura 9

Esquema del agrietamiento térmico



Nota. (Herrera, 2021 p.13).

2.1.4 Metodología De Diseño De Mezclas Asfálticas En Caliente

El principal objetivo del diseño de la mezcla asfáltica es determinar la proporción óptima de los componentes (asfalto, agregado, aire, aditivos) que garanticen el mejor desempeño de ésta durante el período de diseño de una estructura de pavimento flexible o semi-rigidos. La mejor selección de estas proporciones debe garantizar lo siguiente:

Suficiente ligante para garantizar una adecuada resistencia al agrietamiento por fatiga y durabilidad (resistencia al daño por humedad).

Suficiente estabilidad y rigidez de la mezcla, para resistir las deformaciones debidas al tránsito.

Suficientes vacíos de aire que facilitan la densificación de la mezcla por cargas de tránsito, sin que se presenten exudaciones o pérdidas de estabilidad (flujo plástico). Así mismo, un porcentaje de vacíos adecuado para prevenir el ingreso de agua y aire a la mezcla (resistencia al envejecimiento y al daño por humedad).

Suficiente trabajabilidad que garantice la eficiente colocación de la mezcla sin segregación y consumo tolerable de energía de densificación.

Suficiente resistencia al deslizamiento y bajo nivel de ruido, si la mezcla va a ser usada como capa de rodadura (Aguiar et al; 2015, p.7).

2.1.5 Metodología de Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente SUPERPAVE® en Costa Rica

El sistema SUPERPAVE® presenta 3 diferentes niveles de diseño de mezcla; en todos se incluye el diseño volumétrico (base del análisis). Para seleccionar el nivel a emplearse en el diseño de mezcla, se toma en cuenta el tránsito de diseño (típicamente se requiere la cantidad de ejes equivalentes sobre el carril de diseño, para un período de 20 años). Así, en términos de ESAL (ejes equivalentes simples de 8 200 kg) los criterios para definir el nivel de diseño son:

Nivel 1 para los tráficos más ligeros ($\leq\ 1x10^6\ ESAL$)

Nivel 2 para tráficos medios ($1x10^6 - 10x10^6\ ESAL$)

Nivel 3 para tráficos pesados ($\geq\ 10x10^6\ ESAL$) (Aguiar et al; 2015, pp.7-8).

Para escoger la metodología de diseño de mezcla propuesto para Costa Rica. Este esquema se basa en el Protocolo AMAAC desarrollado en el año 2008 por la Asociación Mexicana de Asfaltos. Se plantea el uso de 4 niveles de diseño directamente asociados al nivel de tránsito e importancia del proyecto.

2.1.5.1 Nivel 1. Se plantea para vías de bajo volumen con menos de un millón de ejes equivalentes y consiste en realizar el diseño volumétrico Superpave® (AASHTO M 323 y R 35) y la medición de la susceptibilidad al daño por humedad (AASHTO T 283). Este procedimiento incluye la selección del ligante asfáltico, selección de los agregados, selección de la curva granulométrica óptima y selección del contenido de asfalto óptimo por criterios volumétricos. Finalmente, se incorpora la evaluación de la mezcla al contenido óptimo de asfalto y establecer su susceptibilidad al daño por humedad (se debe cumplir con un mínimo de 85 % de resistencia retenida por tensión diametral (RRTD), de acuerdo con el método AASHTO T 283). Los especímenes acondicionados deben tener una

resistencia mínima a la tensión diametral de 750 kPa a una temperatura de 25 °C (Aguiar et al; 2015, pp.11-12).

2.1.5.2 Nivel 2. Se incorpora la evaluación de la mezcla asfáltica por desempeño y criterios de falla. Está planteado para más de un millón de ejes equivalentes y menos de diez millones de ejes equivalentes. Incluye el nivel 1 más el análisis de la susceptibilidad a la deformación permanente mediante el equipo Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA) (Deformación medida < 5,5 mm a una temperatura de 60 °C, de acuerdo con el método AASHTO T 340) (Aguiar et al; 2015, p.12).

2.1.5.3 Nivel 3. Se incorpora la evaluación de la mezcla asfáltica por criterios de falla más la caracterización física-mecánica de la mezcla asfáltica. Está planteado para más de diez millones de ejes equivalentes y menos de treinta millones de ejes equivalentes. Incluye el nivel 1 más el análisis de la susceptibilidad a la deformación permanente mediante el equipo Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA) (Deformación < 3,5 mm a una temperatura de 60 °C, de acuerdo con el método AASHTO T 340). Adicionalmente, se incluye la caracterización de la mezcla asfáltica mediante el ensayo de módulo dinámico complejo E* de acuerdo con el método AASHTO T 342 junto con PP 62 (Witzack) o TP 79 junto con PP 61 (AMPT) que se puede incorporar en una guía de diseño mecanística-empírica. Finalmente se plantea la evaluación de agrietamiento por fatiga mediante el ensayo de flexotracción en vigas (VF) (AASHTO T 321) (Aguiar et al; 2015, p.12).

2.1.5.4 Nivel 4. Incorpora la evaluación de la mezcla asfáltica por desempeño y criterios de falla más avanzados y está planteado para tránsito de diseño de más de treinta millones de ejes equivalentes. El NIVEL 4 es recomendado para todo proyecto estratégico o de gran importancia a ser desarrollado. Incluye el nivel 1 más el análisis de deformación permanente mediante el uso de la Rueda de Hamburgo (RH) (Deformación < 5,0 mm a 10 000 ciclos de carga a una temperatura de 50 °C, AASHTO T 324) y el análisis de susceptibilidad al daño por humedad/ahuellamiento mediante el uso de la Rueda de Hamburgo (Punto de inflexión de desnudamiento (PID) > 10 000 ciclos de carga, AASHTO

T 324). Adicionalmente, se plantea la evaluación de agrietamiento por fatiga mediante el ensayo de flexotracción en vigas (VF) (AASHTO T 321) para 4 niveles de deformación unitaria y 3 temperaturas (10, 20 y 30 °C). Se incluye la caracterización de la mezcla asfáltica mediante el ensayo de modulo dinámico complejo E* de acuerdo con el método AASHTO T 342 junto con PP 62 (Witzack) o TP 79 junto con PP 61(AMPT). Finalmente se plantea la evaluación de deformación permanente mediante el ensayo triaxial con carga cíclica (RLT) de acuerdo con el método NCHRP 9-19 para 3 temperaturas (Grado de desempeño del proyecto ± 6 °C) (Aguiar et al; 2015, pp.12-13).

Figura 10

Esquema de niveles de metodología de diseño de mezcla asfáltica SUPERPAVE®



Nota. (Aguiar et al; 2015, p.14).

2.1.6 Tipos de Ensayo Usados en la Metodología SUPERPAVE®

2.1.6.1 Diseño Volumétrico de Mezcla Asfáltica Utilizando El Método Superpave®. Este método se aplican las normativas AASHTO R 35 y M 323. El primer paso del diseño de mezclas asfálticas es seleccionar el tipo de ligante adecuado, utilizando el sistema de Grado de Desempeño (PG), que se basa en las temperaturas extremas del lugar de la obra. Este sistema asegura que el ligante tenga el comportamiento necesario durante su construcción y vida útil, manteniendo propiedades como rigidez y elasticidad bajo condiciones críticas de temperatura y envejecimiento.

Los requisitos físicos son iguales para todos los grados PG, pero varían las temperaturas a las que deben cumplirse, definidas estadísticamente según datos climáticos locales. En ausencia de una base de datos climática de al menos 20 años, como es el caso en Costa Rica, se utiliza toda la información disponible en función de la ubicación del proyecto.

El sistema SUPERPAVE® también establece especificaciones comunes para todos los grados PG, que aseguran un buen manejo y calidad del ligante, como el punto de inflamación, viscosidad a 135 °C y pérdida de masa en el ensayo RTFO.

Además, los agregados deben cumplir con propiedades de consenso, como angularidad de partículas gruesas y finas, forma (planas o alargadas) y contenido de arcilla, así como propiedades propias de la fuente, incluyendo resistencia a la abrasión, presencia de materiales indeseables, índice de durabilidad y resistencia a la disgregación en sulfato de sodio.

Una vez seleccionados los materiales, se desarrollan tres granulometrías de prueba y se escoge la mejor según criterios volumétricos. Posteriormente, se determina el contenido óptimo de asfalto usando esos mismos criterios (Aguiar et al; 2015, pp.16-17).

Figura 11

Compactador Giratorio Superpave® (CGS).



Nota. (Lanamme, IT-MZ-07, 2022).

2.1.6.2 Resistencia Retenida por Tensión Diametral (RRTD). Se tiene que realizar de acuerdo con el método AASHTO T 283. Se preparan al menos 6 especímenes para el compactador giratorio que tienen un peso aproximado de 3800 g, la altura de los mismos debe estar entre 90 mm y 100 mm. El nivel de vacíos de aire debe estar entre (7 ± 1)%. La resistencia retenida a la tensión diametral es la relación de resistencia del grupo acondicionado entre la resistencia del grupo seco que debe ser mayor o igual a 85 % (sin efectuar el período de congelamiento). La resistencia a la tensión diametral de los especímenes acondicionados a 25 °C debe ser de al menos 750 kPa (Aguiar et al; 2015, pp.52-53).

Figura 12

Equipo para fallar los especímenes secos y acondicionados.



Nota. (Lanamme, IT-MZ-16, 2022).

2.1.6.3 Deformación Permanente, Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA). En el equipo APA, una rueda cóncava viaja a lo largo de una manguera presurizada, que descansa sobre el espécimen. Los especímenes cilíndricos son compactados en el compactador giratorio con una altura de 75 mm y un diámetro de 150 mm. El APA típicamente usa una carga de 445 N (100 lb) y una presión de 690 kPa (100 psi).

Este ensayo se realiza a una temperatura de 60 °C luego de un acondicionamiento de los especímenes de 6 horas a la misma temperatura (falla en seco). Los vacíos de los especímenes se encuentran entre 6 % y 8 % y el ensayo tiene una duración de 8000 ciclos carga. (Aguiar et al; 2015, p.54).

Figura 13

Montaje de especímenes en el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA).

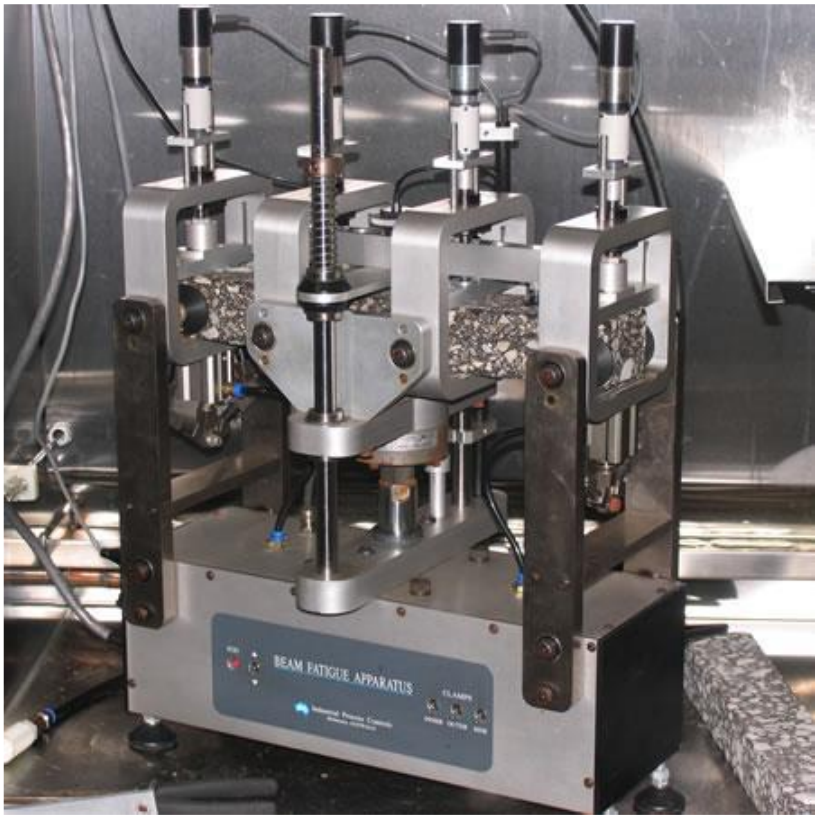


Nota. (Aguiar et al; 2015, p.54).

2.1.6.4 Ensayo a Flexotracción de Vigas. Para la determinación de la cantidad de repeticiones para la falla por fatiga se empleará la metodología AASHTO T 321, se deberán correr como mínimo dos especímenes por deformación unitaria. Los especímenes de ensayo son vigas de mezcla asfáltica, con longitud de 380 mm y sección transversal de 50 mm (ancho) por 63 mm (altura), densificadas de forma que su contenido de vacíos sea de (7,0 ± 1,0) %. Los especímenes de ensayo serán envejecidos, de previo al ensayo, en un horno a 85 °C por 5 días (Aguiar et al; 2015, p.56).

Figura 14

Equipo de flexotracción en vigas



Nota. (Aguiar et al; 2015, p.56).

2.1.6.5 Módulo Dinámico Complejo E*. El módulo dinámico E* de un material viscoelástico, se define como la respuesta desarrollada por el material bajo condiciones de carga sinusoidales en un dominio de frecuencias definidas. Este es un número complejo ya que contiene tanto una parte real como una imaginaria. De acuerdo a la teoría de viscoelasticidad, el valor absoluto del módulo complejo es por definición el Módulo Dinámico del material |E*|.

El ensayo se realiza sobre especímenes extraídos de las pastillas compactadas en el CGS, estos tienen un diámetro de 101,6 mm y 150 mm de alto. Los núcleos deben tener un nivel de vacíos de (7,0 ± 0,5)%. Los especímenes antes de ser compactados se tienen que acondicionar a corto

plazo (4 horas ± 5 min a 135 ± 3 °C). Adicionalmente, los núcleos tienen que cumplir con los criterios de planicidad y perpendicularidad establecidos en el método (AASHTO PP 60).

Mediante la realización de este ensayo es posible conocer el módulo del concreto asfáltico a todos los niveles de análisis de temperatura y tiempos de carga, por medio de la Curva Maestra (AASHTO PP 62 o PP 61). Esta curva es construida utilizando el principio de superposición de tiempo y temperatura. Los datos a las distintas temperaturas ensayadas son corridos con respecto al logaritmo del tiempo hasta que todas las curvas se unen como una sola función. La curva resultante en función del tiempo, describe la dependencia del tiempo del material. Por otra parte, la dependencia del material a la temperatura, está dada por la cantidad de espacio que debe moverse cada curva (Aguilar et al; 2015, pp.56-57).

Figura 15

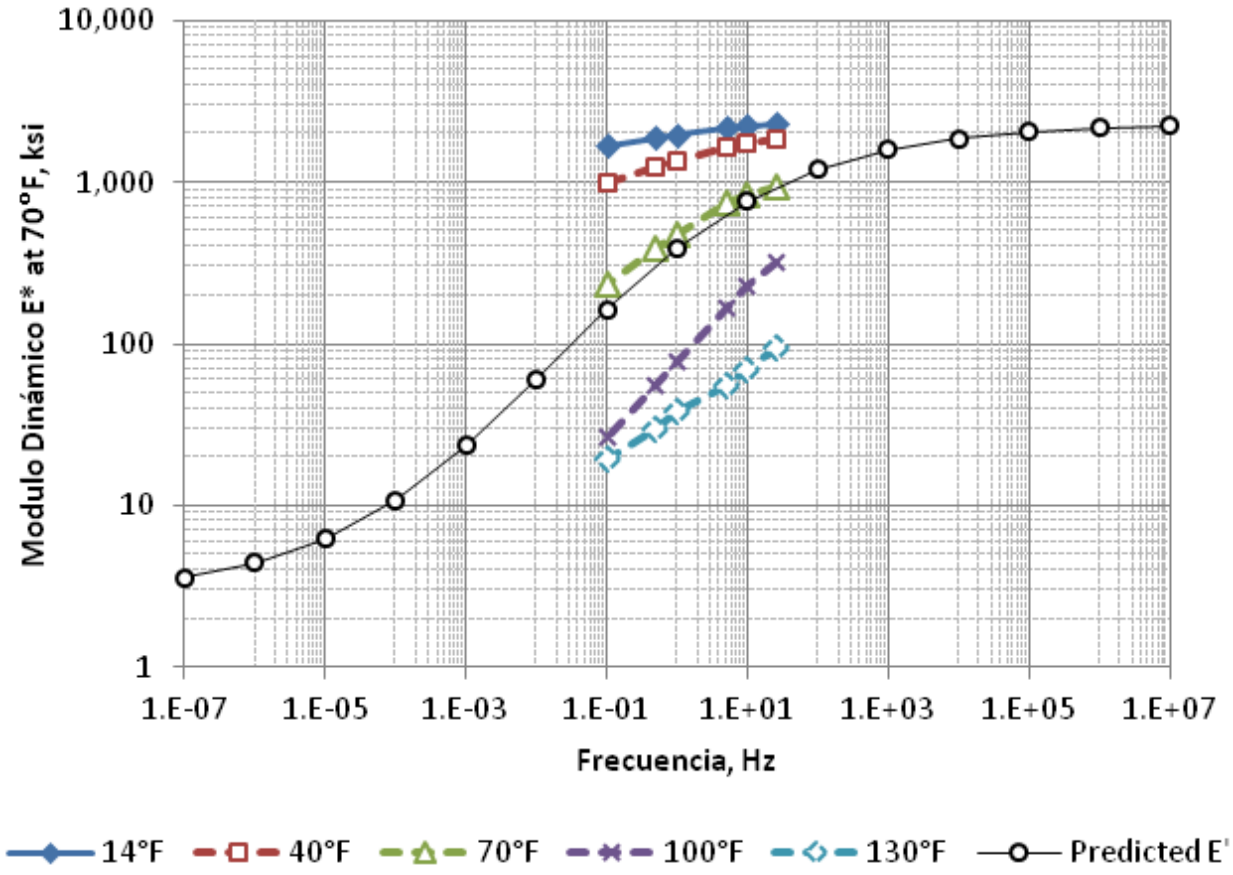
Montaje del ensayo de Módulo Dinámico



Nota. (Aguiar et al; 2015, p.57).

Figura 16

Ejemplo de Curva Maestra



Nota. (Aguiar et al; 2015, p.58).

2.1.6.6 Rueda de Hamburgo. La norma AASHTO T 324 - 19 permite identificar las fallas de la mezcla asfáltica debido al daño por humedad, a la debilidad en la estructura del agregado o a la rigidez inapropiada del aglutinante. La prueba consiste en sumergir en agua, a una temperatura controlada, especímenes de mezcla asfáltica sometida a una carga repetitiva con una rueda de acero de 703 N + 4.5 N, con el fin de determinar la deformación permanente de la muestra provocada por la rueda.

La prueba requiere de especímenes compactados con el compactador giratorio Superpave, con un porcentaje de vacíos de (7+1) %. Una vez efectuada la prueba, es posible definir la deformación del espécimen, identificando la profundidad de la impresión (rutina) expresada en

números de pasadas de la rueda, La profundidad es medida por medio de un dispositivo transductor de desplazamiento lineal (LDT) y toma medidas como mínimo en 11 puntos a lo largo de la longitud de la pista: -114 mm, -91 mm, -69 mm, -46 mm, -23 mm, 0 mm, +23 mm, +46 mm, +69 mm, +91 mm +114 mm.

El ensayo se detiene cuando la rueda ha completado un total de 20 000 pasadas, cuando se alcanza el número establecido por el usuario o cuando se haya llegado a la profundidad máxima de impresión; la cual se calcula según la profundidad promedio de la rutina para las cinco ubicaciones de deformación media a (-46 mm, -23mm, 0 mm, 23 mm, 46 mm).

Figura 17

Rueda de Hamburgo



Nota. (Aguiar et al; 2015, p.59).

2.1.7 Metodología de Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente Marshall en Costa Rica

La metodología de diseño de mezcla asfáltica que durante más tiempo se ha aplicado en Costa Rica es la metodología Marshall. Al igual que todas las metodologías de diseño existentes, la metodología mencionada tiene como finalidad fundamental encontrar la combinación adecuada de agregados minerales y cemento asfáltico, que permita brindarle a la mezcla asfáltica resultante una serie de características físicas y de resistencia que se establecen tanto en los requisitos contractuales de calidad, como en el diseño de la mezcla asfáltica.

Dicha proporción busca establecer el adecuado acomodo de las partículas de agregado y el asfalto, una vez que se conforme la mezcla asfáltica, de manera que garantice que esta pueda soportar los cambios volumétricos resultantes de la compactación por efecto del tráfico. Además, busca encontrar la combinación óptima para soportar los efectos climáticos y el paso de las cargas de tránsito que circularán sobre la carpeta asfáltica.

La metodología de diseño Marshall pretende determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregado. El método también provee información sobre las propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, y establece densidades y contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento (Cervantes & Sequeira, 2014 p.2).

Algunos parámetros de diseño típicos que se consideran dentro de la metodología Marshall se definen en función del tráfico estimado durante la fase de operación de la carretera, tal como se puede observar en la figura 18.

Figura 18

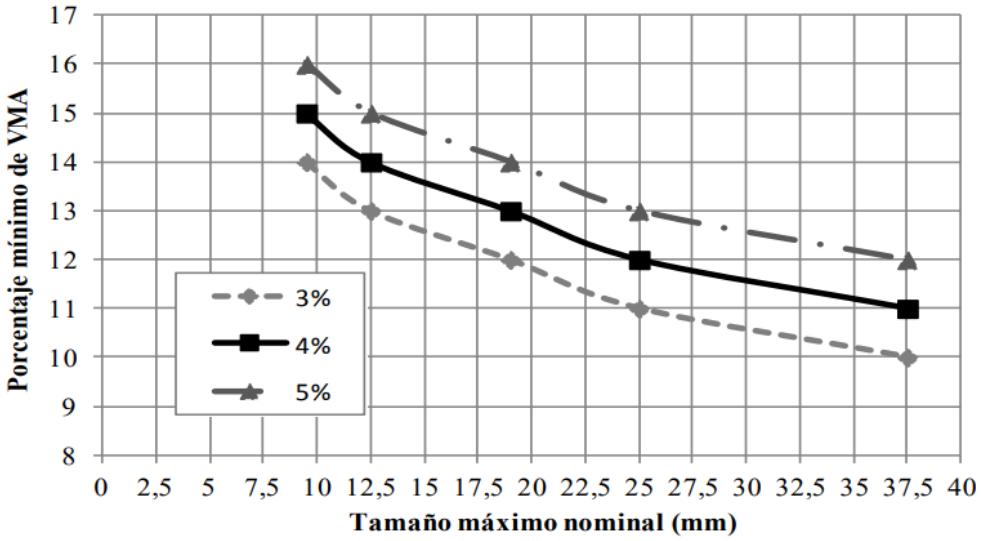
Parámetros típicos de diseño en la Metodología Marshall definidos en función del tráfico

Parámetro de diseño	Tráfico Liviano ($ESAL<10^4$)	Tráfico Medio ($10^4<ESAL<10^6$)	Tráfico Pesado ($ESAL>10^6$)
Compactación (número de golpes por cada lado del espécimen)	35	50	75
Estabilidad, N (kgf)	3.336 (450)	5.338 (550)	8.006 (800)
Flujo, 1/100 pulg (1/100 cm)	8 a 18 (20 a 45)	8 a 16 (20 a 40)	8 a 16 (20 a 35)
Vacíos al aire, %	3 a 5	3 a 5	3 a 5
Vacíos en el agregado mineral (VMA),%	Ver Figura 15		
Vacíos llenos con asfalto (VFA),%	70 a 80	65 a 78	65 a 75

Nota. Cervantes & Sequeira (2014 p.3).

Figura 19

Porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral de acuerdo con el contenido de vacíos de diseño en la mezcla asfáltica



Nota. (Cervantes & Sequeira, 2014, p.3).

2.1.8 Plásticos

Según González (2022) los plásticos son un material sintético que puede ser obtenido de distintas formas, tales como refinado del petróleo, celulosa y otros productos altos en carbono. Los plásticos son

un tipo de polímeros orgánicos que poseen distintas propiedades, tales como maleabilidad, flexibilidad y capacidad de tomar distintas formas, además de tener un buen comportamiento como aislantes eléctricos, resistencia a los ácidos y disolventes. Lo anterior provoca que tengan cualidades aptas para ser utilizados como componente de mezclas asfálticas. Los plásticos se dividen en dos grandes grupos, estos son los termoplásticos y los termoestable, Dentro de estos grupos, los plásticos a su vez se clasifican en elastómeros y plastómeros, cada uno de estos va a contar distintas propiedades y aportes a mezclas asfálticas modificadas (p.14).

> Existen diversos tipos de plástico, los cuales se caracterizan por su grosor y proceso de confección. La identificación de los plásticos es importante para poder separarlos debidamente y determinar el proceso de cada uno.
>
> El sistema de codificación de la Sociedad de Industrias de Plástico (SPI) ayuda a identificar en los envases, botellas, contenedores y recipientes en general, qué tipo de material plástico es usado para su fabricación. El símbolo universal del reciclaje se compone de tres flechas que forman un triángulo con un número en el centro y letras en la base, donde el número y las letras indican la resina usada. El sistema de símbolos utilizado lleva a una fácil identificación de las diferentes resinas plásticas presentes en los envases, los cuales, al ser reciclados, pueden transformarse en artículos para otras aplicaciones de uso durable, con todos los beneficios que esto conlleva (Contreras & Zúñiga, 2020, p.19).

A continuación, se muestra los diferentes tipos de plástico con sus respectivos códigos, propiedades y sus usos comunes.

Figura 20

Codificación de la Sociedad de Industrias de Plástico (SPI)



Nota. (Burrión, 2025).

2.1.9 Clasificación de las Propiedades de los Plásticos

2.1.9.1 Termoplásticos. Poseen gran plasticidad cuando son expuestos a altas temperaturas, pero aún con esta cualidad pueden conservar sus propiedades mecánicas y en especial su resistencia, esto cuando se disminuye el calor aplicado y por ende se enfría (González, 2022, p.14).

2.1.9.2 Termoestables. Presentan una mayor resistencia al calor, por lo que su procesado e inclusión en mezclas asfálticas puede que implique un proceso más complejo y no se obtengan las

características necesarias tales como la adherencia al ligante y agregados, generando problemas de estabilidad en la mezcla asfáltica (González, 2022, p.14).

2.1.10 Clasificación del Comportamiento ante las Cargas de los Plásticos.

Los polímeros pueden ser clasificados como elastómeros o plastómeros, estas clasificaciones pueden dar una idea de cómo se deforma el polímero ante la aplicación de una carga.

2.1.10.1 Los Elastómeros. Son polímeros deformables a temperatura ambiente, también son compresibles al aplicarles una carga, pero posterior a esta regresan a su condición inicial. Dentro de sus principales propiedades son la alta resistencia a la deformación y su comportamiento elástico.

2.1.10.2 Los Plastómeros. Se definirse como polímeros con un comportamiento más plástico, donde las deformaciones que estos sufren tienden a ser permanentes, es decir, son más rígidos que los elastómeros, lo cual podría afectar la mezcla asfáltica, ya que tiende a rigidizar la mezcla, lo cual no es deseado (González, 2022, pp.14-15).

2.1.11 Tipos de plástico Utilizados en Mezclas Asfálticas

2.1.11.1 Tereftalato de Polietileno (PET). Es un elastómero termoplástico que, posee algunas ventajas con respecto a otros termoplásticos, estas son la estabilidad térmica, química y facilidad de procesamiento, además de que puede ser reciclado en un 100 %. El PET es un material que ha visto un aumento en su utilización (González, 2022, pp.16).

2.1.11.2 Polietileno de Alta Densidad (HDPE / PEAD).

Es un polímero termoplástico compuesto por unidades de etileno, ampliamente utilizado debido a sus destacadas propiedades físicas y químicas. Entre sus principales características se encuentra su excelente resistencia térmica y química, así como una muy alta resistencia al impacto. Es un material sólido, incoloro, translúcido y casi opaco, que además presenta una muy buena procesabilidad, pudiendo ser moldeado mediante técnicas comunes como la inyección y la extrusión.

El HDPE es más rígido que el polietileno de baja densidad, pero mantiene una notable flexibilidad incluso a bajas temperaturas. También ofrece facilidad para ser impreso, pintado o pegado, lo que amplía sus aplicaciones industriales. Su densidad se encuentra en el rango de 0.94 a 0.97 g/cm³, lo que lo convierte en un material muy ligero. No es atacado por ácidos y puede trabajar con líquidos hasta una temperatura máxima recomendada de 60 °C, ya que a temperaturas superiores su vida útil se reduce. Aunque existen otros termoplásticos con mejor resistencia a altas temperaturas, el HDPE destaca por su excelente comportamiento en procesos de reciclaje tanto mecánico como térmico, lo que lo convierte en una opción eficiente y sostenible (Contreras & Zúñiga, 2020, pp. 23-24).

2.1.11.3 Policloruro de vinilo (PVC). Es un plástico perteneciente al grupo de los termoplásticos, por lo que presenta cierta maleabilidad cuando se expone al calor, el PVC pasa de un estado sólido a uno viscoso cuando se calienta, y se rigidiza cuando se enfría, esto facilita la incorporación en las mezclas asfálticas en caliente, por lo que es utilizado para la modificación de estas. Este tipo de plástico es común encontrarlo como desecho, ya que se utiliza para la fabricación de mangueras, tuberías, juguetes y otros materiales en la construcción, por lo que la generación de residuos de PVC es importante (González, 2022, p.15).

2.1.11.4 Polietileno de baja densidad / plástico Peletizado (LDPE). Es un termoplástico derivado del etileno, conocido por su buena resistencia térmica y química, soportando temperaturas continuas de hasta 80 °C y picos de hasta 95 °C por cortos periodos. Posee una adecuada resistencia al impacto y una excelente procesabilidad, lo que permite su conformado mediante técnicas comunes como la inyección y la extrusión. Visualmente, presenta un color lechoso, aunque puede volverse transparente según su espesor. Comparado con el HDPE, el LDPE es más flexible, aunque tiene menor rigidez. Su densidad varía entre 0.91 y 0.94 g/cm³. Sin embargo, una de sus limitaciones es la dificultad para ser impreso, pintado o adherido, lo que restringe ciertas aplicaciones superficiales (Contreras & Zúñiga, 2020, pp. 25-26).

2.1.11.5 Polipropileno (PP). Pertenece al grupo de los termoplásticos, por lo que posee las mismas cualidades mencionadas anteriormente para el PVC. Este tipo de plástico se utiliza para la producción de tapas para botellas desechables, bolsas, partes de automóviles y otros tipos de productos.

La presencia de este en el ambiente es alta, principalmente de las botellas desechables, que son una parte importante de las 440 toneladas de desechos que se generan en Costa Rica, lo que implica que la cantidad de este material que se puede obtener sea considerable para ser utilizada a gran escala en mezclas asfálticas modificadas (González, 2022, pp.15-16).

2.1.11.6 Poliestireno (PS). Se caracteriza por su brillo, transparencia, dureza, facilidad para ser trabajado, buena capacidad para ser teñido, notable estabilidad dimensional y un precio accesible. En el mercado existen variantes modificadas del poliestireno de uso general (GPPS), las cuales ofrecen diferentes niveles de resistencia al calor y a los impactos.

Una de estas variantes es el poliestireno de alto impacto (HIPS), el cual, durante su fabricación, incorpora caucho que se dispersa en la matriz del polímero, generando una interacción química que mejora su resistencia al impacto y lo hace más dúctil. Sin embargo, esta modificación reduce su transparencia y disminuye su punto de ablandamiento. El HIPS se emplea ampliamente en la producción de juguetes, carcasas, envases, señalización vial, tazas, tapas y otros artículos similares (Casas & Metaute, 2009, pp. 13-14).

2.1.11.7 Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS). Es un tipo de polímero que destaca por ser rígido, pero no frágil, además de poseer una gran dureza y resistencia química. Su producción se basa en la copolimerización del estireno y el acrilonitrilo en presencia de látex de polibutadieno, lo que da como resultado un copolímero en bloque.

Este material presenta baja absorción de humedad, excelente estabilidad dimensional, buenas propiedades eléctricas y una alta resistencia al desgaste. Estas cualidades lo hacen ideal para múltiples

aplicaciones, encontrándose comúnmente en partes automotrices, juguetes, electrodomésticos, así como en carcasas de equipos electrónicos como computadoras y teléfonos (Casas & Metaute, 2009, pp. 12-13).

2.1.11.8 Bumper (Parachoques de Vehículos). Este material posee diversos componentes con diferentes propiedades y en determinadas ocasiones no presentan los mismos compuestos, por lo que no se puede dar una clasificación exacta del material. Entre los compuestos que contiene el bumper se encuentran mezclas de policarbonato, poliéster termoplástico, resina de plástico, polipropileno reforzado con fibras de vidrio o poliuretano con rellenos de espuma de poliuretano y olefinas termoplásticas reforzadas (Aguiar, Leiva, Salazar, Loria, Villegas & Navas, 2015).

2.1.11.9 Resin8 ™ / Agregado de Resina Pre-condicionado (ARP). Solución patentada y única qué consiste en una mezcla extruida de un 80% de plástico reciclado (de varios orígenes) y un 20% de materiales minerales (principalmente un 10% de cal y un 10% de ceniza de madera). Su apariencia es como la de una arena. La cal se utiliza principalmente como relleno antiséptico para eliminar cualquier contaminación que pueda contener el plástico. Aparte de la ceniza de madera, también se pueden utilizar otros tipos de ceniza, por ejemplo, de desechos de caña de azúcar, café o plástico. El proceso de extrusión consiste en mezclar los materiales indicados a una temperatura entre 190°C a 200°C para plásticos de baja densidad y hasta un máximo de 230°C para plásticos de alta densidad como el PVC (Gómez, Loría, Thompsom & Zamora, 2023, p.3).

2.1.12 Economía Circular y Pavimentos Flexibles con Residuos Plásticos

Según Villegas (2021):

Por definición, la economía circular es un sistema restaurador y regenerativo que tiene como finalidad conservar los productos, componentes y materiales en su mayor nivel de utilidad y valor en todo momento. Este modelo impulsa la recirculación tanto de materiales como de energía dentro de los mismos sistemas productivos o en alternativas similares, lo que permite reducir significativamente la generación de residuos evitables.

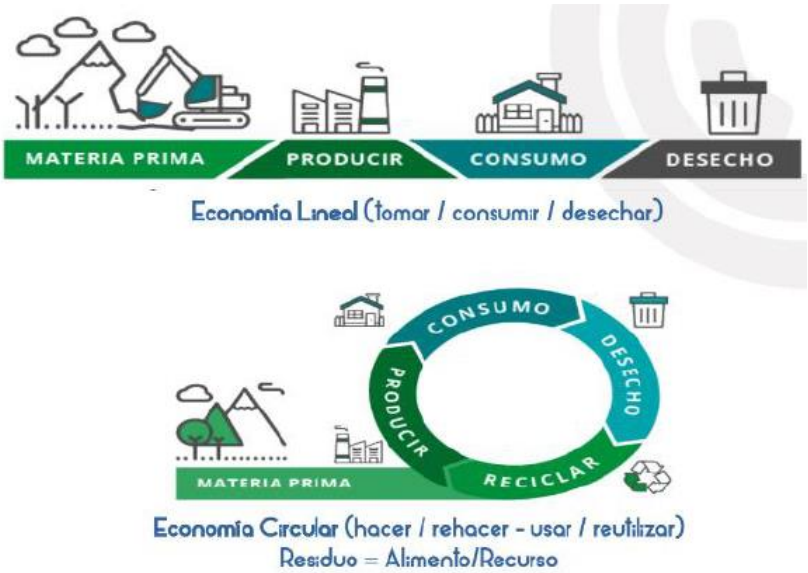
La economía circular integra principios provenientes de diversas escuelas de pensamiento, entre ellas la ecología industrial, la simbiosis entre procesos, la economía del rendimiento, el diseño inspirado en la naturaleza, el enfoque de cuna a cuna, la economía azul, el diseño regenerativo y la producción más limpia y en armonía con los sistemas naturales.

Aunque existen múltiples definiciones ampliamente aceptadas, muchas de ellas coinciden en caracterizar a la economía circular como un modelo diseñado para ser restaurativo y regenerativo, cuyo propósito es mantener el valor de los productos, componentes y materiales durante el mayor tiempo posible, diferenciando claramente entre los ciclos técnicos y biológicos (p.42).

En este marco, la incorporación de residuos plásticos en pavimentos flexibles representa una solución innovadora y sostenible, al transformar un desecho de difícil degradación en un insumo útil para la infraestructura vial. Esta práctica no solo mejora las propiedades del asfalto, como su durabilidad y resistencia, sino que también contribuye a la reducción de la contaminación plástica, alineándose con los principios de regeneración y reutilización propios de la economía circular.

Figura 21

Modelos de Economía Lineal y Economía Circular



Nota. (Villegas, 2021, p.43).

2.2 Estado de la Cuestión

Las mezclas asfálticas modificadas con plástico de desecho representan una innovación en la ingeniería vial que busca mejorar el desempeño de los pavimentos mientras se aprovecha un material de difícil disposición. En los últimos años, esta alternativa ha captado el interés de gobiernos, instituciones académicas y empresas privadas como una solución sostenible ante la creciente acumulación de residuos plásticos y la necesidad de pavimentos más duraderos y resistentes.

El uso de plástico reciclado en mezclas asfálticas ha sido objeto de diversas investigaciones y proyectos piloto en distintas partes del mundo, para la elección del tipo de plástico en las mezclas asfálticas depende de la disponibilidad de residuos, las propiedades mecánicas y térmicas requeridas, y la compatibilidad con el betún asfáltico.

Tanto a nivel nacional como internacional, se han desarrollado diversas propuestas para el uso de plástico reciclado en mezclas asfálticas. A continuación, se describen los tipos de plásticos empleados y las investigaciones relacionadas con su aplicación.

2.2.1 Asfalto y Pavimentos Flexibles Modificado con Tereftalato de Polietileno (PET)

Se evaluó el uso del PET reciclado como modificador en mezclas asfálticas, el mismo es un elastómero termoplástico con buena estabilidad térmica y química, puede reciclarse al 100 %, lo que lo convierte en una opción atractiva tanto por sus propiedades técnicas como por su contribución ambiental.

A continuación, las investigaciones se centran en analizar el comportamiento mecánico del pavimento flexible modificado con PET, específicamente frente a la fatiga y la deformación permanente. Para ello, se emplean los métodos de diseño de MAC como Marshall y Superpave, permitiendo comparar el desempeño de las mezclas y determinar la viabilidad del uso de PET en el diseño de pavimentos sostenibles.

2.2.1.1 Incorporación de PET Reciclado por Vía Húmeda en Mezclas Asfálticas en Caliente.

En el año 2021 Diego Pilatuña & Jefferson Rodríguez en su tesis titulada “Incorporación de plástico reciclado mediante vía húmeda en una mezcla asfáltica en caliente utilizando agregados pétreos del Cantón Guamote”, de la Universidad Nacional de Chimboraza Ecuador, su objetivo principal es comparar las propiedades mecánicas Marshall de una mezcla asfáltica convencional versus una mezcla asfáltica modificada (p.3).

En el desarrollo de la investigación, se realizó el diseño Marshall con el plástico PET reciclado fundido, manteniendo las características del diseño de la mezcla asfáltica con ligante bituminoso AC-20. Una vez obteniendo el porcentaje óptimo e índice de rigidez de ambos diseños, para luego con los resultados realizar la comparación respectiva con el grupo de control a través del ensayo Marshall.

Según Pilatuña & Rodríguez (2021) en el diseño de la mezcla asfáltica se realizó los ensayos del agregado pétreo requeridos por la norma MOP 001F-2002, cumpliendo con su mayoría. Posteriormente se calculó el porcentaje teórico del ligante bituminoso utilizando la formula francesa a partir la granulometría combinada de agregados pétreos, determinando los porcentajes que conforma el esqueleto mineral de la mezcla asfáltica realizando iteraciones de cada material a utilizar (p.38).

La fórmula maestra de trabajo para la mezcla asfáltica convencional está constituida por: 31.8% de agregado 3/4¨; 56.12% de agregado 3/8¨; 5.61% de agregado fino; 6.47% de ligante bituminoso, constituyendo el 100% de la mezcla total (Pilatuña & Rodríguez, 2021, p.43).

Para realiza la mezcla asfáltica modificada con la combinación óptima entre agregados y ligante bituminoso, se incorporará material triturado PET en estado líquido al porcentaje de ligante con una variación del 5% en la cual se conserva la masa del agregado pétreo y se modifica el porcentaje de ligante + PET (Pilatuña & Rodríguez, 2021, p.43).

A continuación, se detalla tanto los parámetros volumétricos de diseño de mezcla convencional como del modificado, donde se pueden apreciar diferencias en las características de los dos diseños.

Tabla 2

Resultados para la mezcla asfáltica convencional y modificada.

Parámetros	Mezcla asfáltica convencional	Mezcla asfáltica modificada
% Plástico	-	0.582
% Asfalto	6.470	5.888
Estabilidad (kg)	2450	3300
% Vacíos	4	5
Flujo (mm)	17.50	12.920
Densidad Bulk	2.232	2.137

Nota. (Pilatuña & Rodríguez, 2021).

La mezcla asfáltica convencional en caliente está constituida por 93.53% del esqueleto mineral y 6.47% de asfalto, sumando así el 100% de la mezcla total. Para obtener el porcentaje de incorporación PET para la mezcla asfáltica modificada, se determinó mediante los ensayos Marshall un porcentaje óptimo de 0.582% PET y 5.888% de asfalto, siendo la relación 9% PET y 91% asfalto, teniendo así una nueva combinación y manteniendo el porcentaje de la mezcla total (Pilatuña & Rodríguez, 2021, p.50).

Según Pilatuña & Rodríguez (2021) concluye que:

Al analizar los resultados de las briquetas elaboradas con material pétreo, ligante bituminoso AC-20 y plástico triturado PET incorporado de manera líquida, se observaron mejoras notables en comparación con la mezcla asfáltica convencional. Se registró un incremento en la estabilidad, pasando de 2450 lb a 3300 lb, y una disminución en el flujo, de 17.50 a 12.92 pulgadas/100. Estos se atribuyen, en parte, a la selección de un 5% de vacíos de aire en la mezcla, lo que permitió que el asfalto llenara adecuadamente los espacios sin causar exudación ni agrietamiento.

La incorporación de PET triturado por vía húmeda mostró ser compatible con el ligante bituminoso y los agregados pétreos, ya que el plástico en estado líquido recubre el agregado formando una película delgada, mejorando así la adhesión al ligante a altas temperaturas. Durante la mezcla y el ensayo de las briquetas no se presentaron irregularidades en la compactación. En conjunto, la adición de plástico PET

permitió aumentar la capacidad de carga de la mezcla y reducir su deformación, lo que indica un desempeño superior respecto al asfalto convencional (pp.49-50).

2.2.1.2 Efecto del PET Reciclado en la Estabilidad y Flujo Marshall de Mezclas Asfálticas.

En el año 2022 Jean Karlos Charcape en su tesis titulada: “Efecto de polímeros reciclados en la estabilidad y flujo Marshall en pavimento asfáltico en el anexo cruce Cascas, la Libertad”. En la investigación se tuvo como objetivo general valuar el efecto de los polímeros reciclados en la estabilidad y flujo Marshall en pavimento Asfáltico en el Anexo Cruce Cascas, La Libertad, Perú.

En primera instancia se realizó un análisis de las características físicas de los materiales pétreos utilizados, los cuales fueron sometidos a diferentes ensayos obteniendo como resultado que cumplen con los parámetros mínimos y máximos del MTC EG-2013, con lo cual comprueba un correcto control de calidad de los materiales pétreos, correspondiente a cada ensayo, para posterior elaboración de las mezclas asfálticas. Por otra parte, entre las características más relevantes del polímero sintético reciclado que contiene el Tereftalato de polietileno más conocido como PET. Tuvo como característica su peso específico del PET reciclado que se obtuvo un valor de 1.39 gr/cm3; respecto a su granulometría se tuvo una granulometría uniforme con no muchas variaciones en su gradación (Charcape, 2022, pp. 23-24).

Según Charcape (2022) para determinar la influencia del PET reciclado (1%, 3% y 6%) sobre la fluencia en las características de la mezcla asfáltica en caliente. Se ha considerado para la clase de mezcla tipo A (Tránsito pesado) una compactación de número de golpes por lado de 75, según la prueba Marshall MTC E504 o ASTM D1559. Y se utilizó el cemento asfáltico PEN 85/100 (p.26).

A continuación, se detalla tanto los parámetros volumétricos de diseño de mezcla convencional como del modificado con 1%, 3% y 6% de PET reciclado, donde se pueden apreciar diferencias en las características de los diseños.

Tabla 3

Resultados para la mezcla asfáltica convencional y modificadas.

Parámetros	Mezcla asfáltica convencional	Mezcla asfáltica Modificada 1%	Mezcla asfáltica Modificada 3%	Mezcla asfáltica Modificada 6%
% Plástico	-	-	-	-
% Asfalto	5.7	5.6	5.6	5.6
Estabilidad(kg)	1002	1379	1602	1113
% Vacíos	3.6	5.9	11.1	14.59
Flujo (mm)	12.05	13.31	13.90	16.66

Nota. (Charcape, 2022).

Según Charcape (2022) concluye que:

Se determinó que la incorporación de polímero reciclado PET afectó negativamente la fluencia en el ensayo Marshall (ASTM D1559 – MTC E504), ya que los resultados obtenidos estuvieron por debajo del rango mínimo exigido por la norma MTC EG-2013. La mezcla convencional presentó una fluencia de 12.05 mm, mientras que al añadir 1% de PET alcanzó 13.31 mm, con 3% llegó a 13.90 mm y con 6% subió a 16.66 mm. Esto representó un incremento de 150.63% en relación al valor mínimo normativo de 8 mm en la mezcla sin PET, y con las diferentes dosis de PET (1%, 3%, 6%) el aumento fue de 166.38%, 173.75% y 208.25% respectivamente. Así, se observó que la fluencia crece conforme se incrementa la cantidad de PET reciclado, lo que genera una menor capacidad de la mezcla para resistir deformaciones, disminuyendo su habilidad de adaptarse a las cargas dinámicas.

Por otro lado, se identificó que el porcentaje de PET reciclado impactó positivamente en la estabilidad Marshall de las mezclas asfálticas según la normativa MTC E504. La mezcla convencional presentó una estabilidad de 1002 kg, mientras que con 1% de PET se elevó a 1379 kg, con 3% a 1602 kg y con 6% a 1113 kg. Comparado con el mínimo normativo de 830 kg, las variaciones incrementales fueron de 120.72%, 166.14%, 193.01% y 134.10% respectivamente. Por lo tanto, aunque un aumento excesivo de

PET puede afectar la fluencia, su incorporación en proporciones controladas mejora notablemente la estabilidad de la mezcla asfáltica (pp.33-34).

2.2.1.3 Comparación Técnica entre Mezclas Asfálticas Convencionales y Modificadas con Plástico Reciclado PET.

En el año 2017 Deyvis Fausto Silvestre en su tesis titulada “Comparación técnica y económica entre las mezclas asfálticas tradicionales y reforzadas con plástico reciclado en la ciudad de Lima-2017”. En el desarrollo de la investigación, se realizó el diseño Marshall con el cemento asfáltico PEN 60/70 y añadiéndole al agregado el plástico molido, manteniendo las características del diseño de la mezcla asfáltica convencional. Una vez obtenido el porcentaje óptimo de cemento asfáltico y el índice de rigidez de los diseños, para luego con los resultados realizar la comparación respectiva con el grupo de control a través del ensayo Marshall (p.49).

En el desarrollo de esta investigación se realizó el diseño de mezclas asfálticas en caliente mediante el método Marshall, con el objetivo de evaluar sus parámetros a cinco niveles de contenido de cemento asfáltico (4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0% y 6.5%). Este procedimiento se aplicó tanto a la mezcla asfáltica tradicional como a una mezcla modificada, en la que se incorporó un 1% de plástico triturado como variable de análisis.

Al comparar muestras de mezclas asfálticas convencionales se determina que las que contienen un porcentaje de asfalto de 5.6% es el más óptimo, y para las mezclas asfálticas modificadas con 1% de plástico, el porcentaje más óptimo de asfalto es de 5.8%.

A continuación, se detalla tanto los parámetros volumétricos de diseño de mezcla convencional como del modificado, donde se pueden apreciar diferencias en las características de los dos diseños.

Tabla 4

Resultados para la mezcla asfáltica convencional y modificada.

Parámetros	Mezcla asfáltica convencional	Mezcla asfáltica modificada
% Plástico	-	1
% Asfalto	5.6	5.8
Estabilidad (kg)	1389.0	1434
% Vacíos	3.9	3.7
Flujo (mm)	3.7	3.6
Factor de rigidez (kg/ cm²)	3778	3966

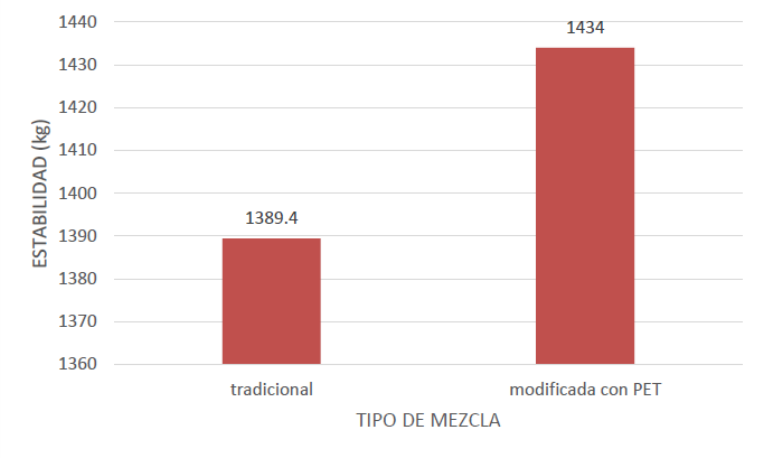
Nota. (Silvestre, 2017).

Silvestre (2017) concluye que:

La mezcla asfáltica modificada evidencia un aumento en la estabilidad, resistiendo una carga adicional de 44.6 Kg, es decir, un 3.11 % más con respecto a la mezcla convencional, lo cual es un indicativo que la mezcla asfáltica modificada con PET proporciona mayor resistencia a deformaciones que la mezcla tradicional, ayudando a la resistencia a las deformaciones permanentes (p.83).

Figura 22

Tipo de Mezcla Vs. Estabilidad.

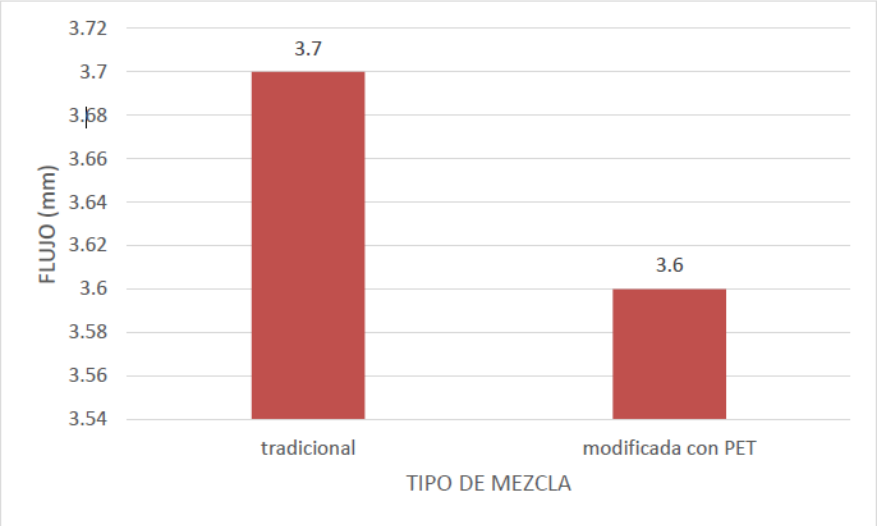


Nota. (Silvestre, 2017, p.83).

Se muestra que la mezcla asfáltica experimental presenta una leve reducción en el flujo de 2.70 % con respecto a la mezcla tradicional, lo cual indica que además de proporcionar propiedades elásticas a la mezcla, también aporta rigidez, obteniendo una mezcla con dos cualidades muy importantes para la resistencia ante las deformaciones permanentes (Silvestre, 2017, (p.84).

Figura 23

Tipo de mezcla Vs. Flujo

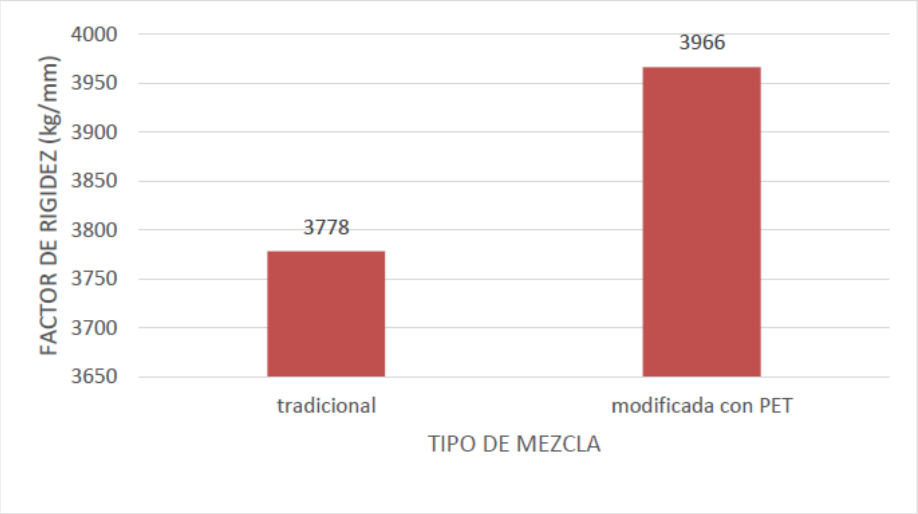


Nota. (Silvestre, 2017, p.84).

En siguiente figura se puede apreciar el factor de rigidez el cual existe una gran diferencia entre ambas mezclas. Por un lado, la mezcla tradicional presentó un factor de rigidez de 3788 Kg/cm², mientras que la mezcla experimental presentó un valor de 3966 Kg/cm², representando un incremento de 4.49 %. Por lo tanto, se puede confirmar que el PET en la mezcla aporta una mayor rigidez a la mezcla, lo cual evidencia un mejor comportamiento a las deformaciones permanentes (Silvestre, 2017, p.85).

Figura 24

Tipo de mezcla VS. Índice de rigidez.



Nota. (Silvestre, 2017, p.85).

2.2.2 Asfalto y Pavimentos Flexibles Modificado con Polietileno de Alta Densidad (HDPE/PEAD)

En la búsqueda de alternativas sostenibles para mejorar el desempeño de los pavimentos flexibles, el uso de materiales reciclados como el HDPE ha despertado interés en diversas investigaciones, es un polímero termoplástico con excelentes propiedades térmicas, químicas y mecánicas, que además destaca por su alta resistencia al impacto, ligereza y facilidad de procesamiento. Estas características, junto con su amplia disponibilidad como residuo plástico, lo convierten en un material viable para la modificación de mezclas asfálticas, se utiliza el método Superpave como base de evaluación.

2.2.2.1 Evaluación del HDPE Reciclado de Bolsas de Banano como Modificador de Asfalto.

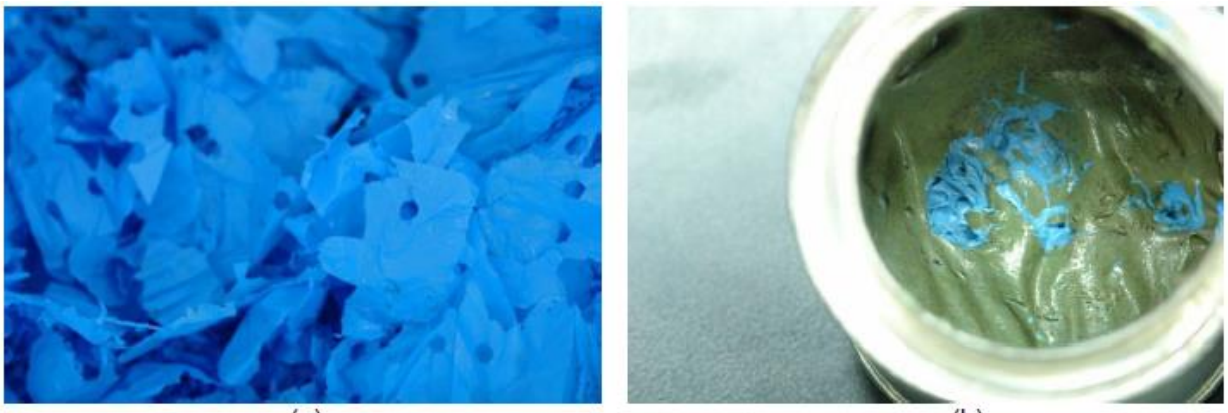
En la investigación desarrollada por José Aguiar, José Pablo Corrales, Wilmar Dario Fernández, Luis Guillermo Loria, Fredy Reyes & Rafael Villegas en el año 2012 llamada “Métodos avanzados de análisis de ciencia de los materiales y nanomateriales utilizados en la modificación de asfaltos” se reutilizó el plástico de bolsas de polietileno, usadas para cubrir racimos de banano, como aditivo para modificar el bitumen AC-30 (PG64-22), con el objetivo de reducir el impacto ambiental del cultivo bananero. Debido a que este

residuo carece de ficha técnica, se realizó una clasificación detallada para evaluar su viabilidad como modificante. Se llevaron a cabo análisis químicos mediante espectroscopía RAMAN, y pruebas térmicas con DSC y TGA para determinar su temperatura de fusión y descomposición. La Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) confirmó una adecuada dispersión del polímero en el bitumen y reveló su topografía. La composición química del bitumen base fue caracterizada con cromatografía IATROSCAN y espectroscopía infrarroja, evidenciando la incorporación del polímero. Finalmente, el comportamiento mecánico del asfalto modificado se evaluó con el Reómetro Dinámico de Cortante (DSR) en pruebas de CREEP, recuperación bajo múltiples niveles de esfuerzo y fatiga, comparándolo con asfaltos modificados comercialmente (p.2).

El uso de bolsas de banano para modificar asfalto es más complejo que usar polietileno estándar debido a la presencia de residuos de insecticidas como el clorpirifos, altamente tóxicos. Para su tratamiento, las bolsas fueron limpiadas rigurosamente con aire, solventes (tetrahidrofurano y acetona), y finalmente con agua y jabón, eliminando residuos sólidos y compuestos orgánicos. Posteriormente, se cortaron en fragmentos de 4 cm, tamaño definido por ensayo y error, ya que piezas grandes formaban cápsulas difíciles de mezclar con el betún (Aguiar et al; 2012, p.4).

Figura 25

Proceso de incorporación de las bolsas de PET al ligante asfaltico



(a) (b)

(a) Bolsa de banana procesada (b) Encapsulamiento del polietileno

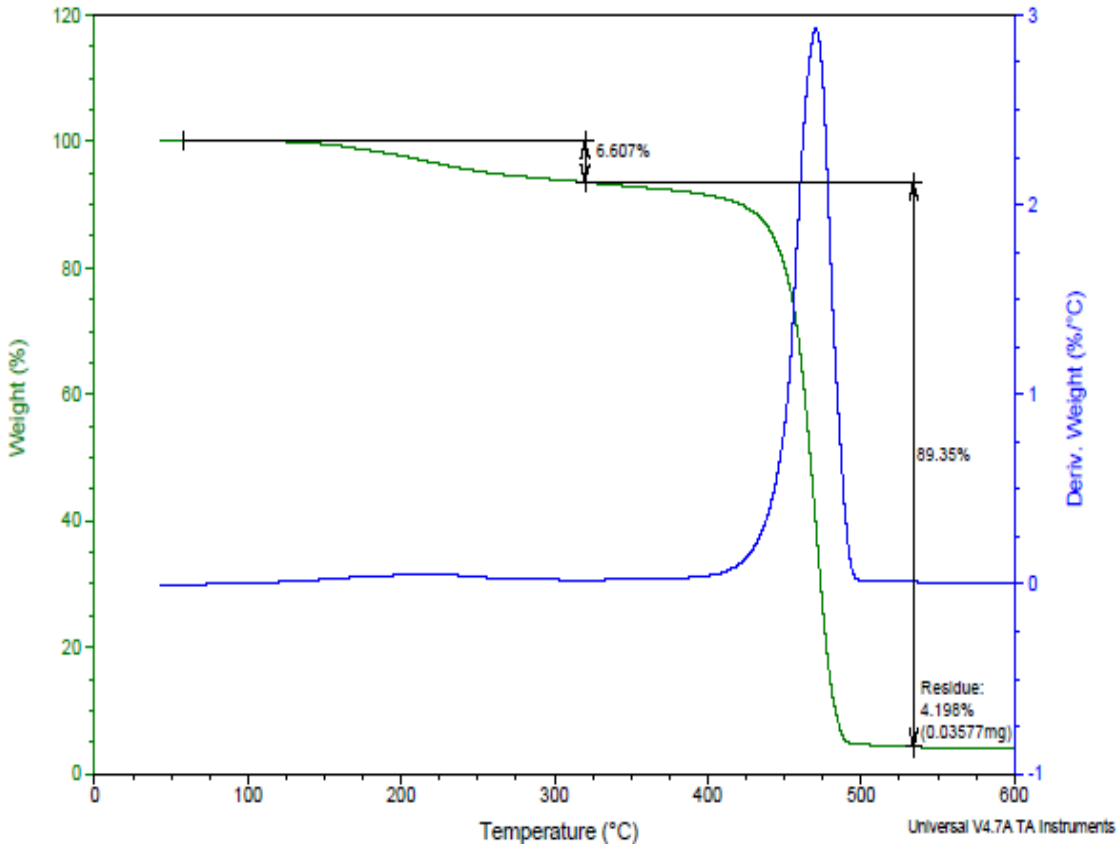
Nota. (Aguiar et al; 2012, p.4).

Análisis Termogravimétrico (TGA) y Barrido Calorimétrico por Escaneo Diferencial (DSC)

Los análisis obtenidos con el TGA realizado a una temperatura de 25 a 800°C muestran que el material inicia su degradación hacia los 150°C, entre esta temperatura y los 325°C se observó la pérdida de un 6.6% de algún material o materiales, que pudiesen ser productos adheridos en el proceso de exposición de la bolsa en la plantación como clorpirifos, a los 450°C se presentó la degradación total. En el análisis (DSC) se realizó desde 25°C hasta 200°C. Se observó que el material que compone la bolsa es un polietileno de alta densidad, ya que su punto de fusión se encuentra entre los 120-136°C (Aguiar et al; 2012, pp.5-6).

Figura 26

Grafica de resultados análisis TGA del PET

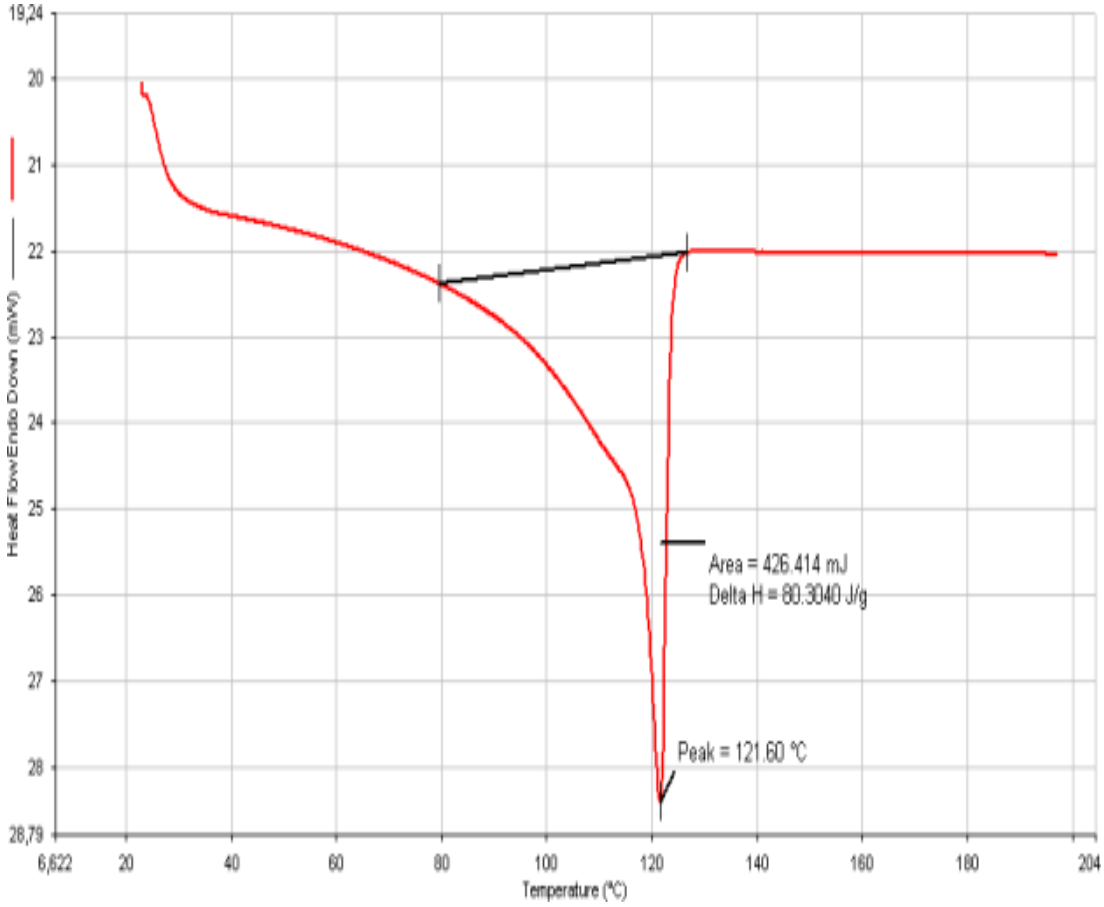


TGA

Nota. (Aguiar et al; 2012, pp.5-6).

Figura 27 Grafica de resultados análisis DSC del PET

Grafica de resultados análisis DSC del PET



DSC

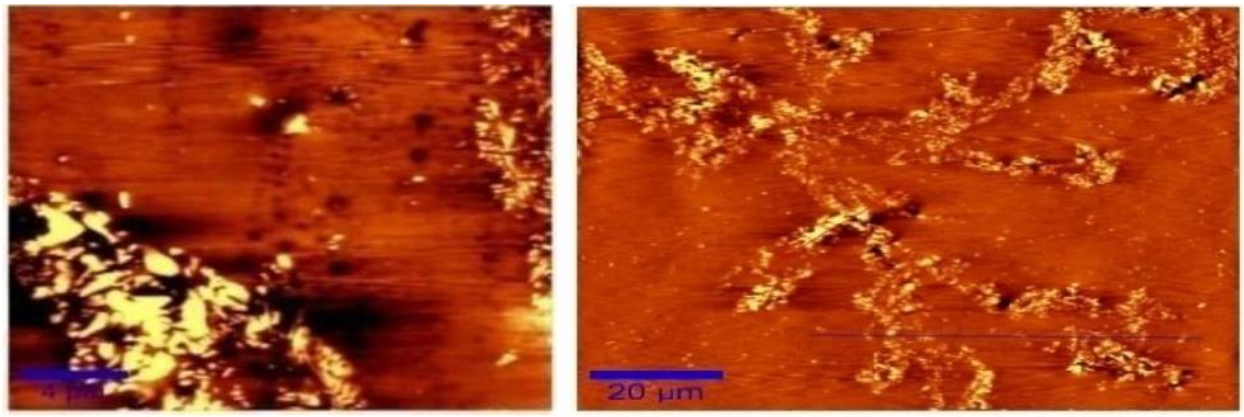
Nota. (Aguiar et al; 2012, pp.5-6).

Análisis Microscopía de Fuerza Atómica (AFM)

La Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) es un método de muy alta resolución, el cual permite medir en el orden de nanómetros, lo cual es varios órdenes de magnitud superior (aproximadamente 1.000) a los microscopios de difracción óptica (Aguiar et al; 2012, p.7).

Figura 28

Topografía y la rugosidad de muestras del asfalto AC-30 sin modificar y modificado con bolsa de banano.



Nota. (Aguiar et al; 2012, p.7).

Reómetro Dinámico de Cortante (DSR)

Como se observa en la figura 29 que a 60 °C, el asfalto modificado con plástico proveniente de bolsas de banano presenta una viscosidad comparable a la del asfalto modificado con polímeros comerciales tipo SBS o SBR, se analiza el aumento de viscosidad del asfalto AC-30 al ser modificado con plástico PET, adicionalmente, se caracterizó el desempeño del asfalto sin modificar y modificado, bajo distintas condiciones de envejecimiento, según la metodología Superpave según se muestra en misma figura. Se observa que en general la modificación con el polietileno de la bolsa de banano incrementa el PG entre 3 y 12 grados aproximadamente (Aguiar et al; 2012, p.7).

Figura 29

Comparación de viscosidades de los asfaltos e indicadores de desempeño definidos por Superpave® para los asfaltos.

G*/senδ ≥ 1 kPa, Original Bitumen			
Test Temperature	64 °C	70 °C	76 °C
AC-30	1.78	0.89	0.47
SBR(A)	2.79	1.42	0.75
Banana Bag	3.11	1.53	0.80
SBR(B)	3.72	1.97	1.06
SBR(C)	3.00	1.52	0.81
SBS(A)	5.39	2.72	1.44
SBS(B)	3.60	2.04	1.20
G*/senδ ≥ 2,2 kPa, RTFO-aged Bitumen			
Test Temperature	64 °C	70 °C	76 °C
AC-30	5.97	2.94	1.47
SBR(A)	9.74	4.92	2.55
Banana Bags	11.31	5.55	2.77
SBR(B)	-	-	-
SBR(C)	9.23	4.87	2.60
SBS(A)	18.80	10.02	5.24
SBS(B)	13.84	8.13	4.89
G*·senδ ≤ 5 MPa, PAV+RTFO-aged Bitumen			
Test Temperature	Intermediate Temp. (°C)	MPa	
AC-30	22	4.14	
SBR(A)	22	4.60	
Banana Bags	22	4.14	
SBR(B)	-	-	
SBR(C)	13	4.20	
SBS(A)	25	4.06	
SBS(B)	22	4.89	

Bitumen type	Viscosity (Poises)
LPI-03 (AC-30)	2854
SBR(A)	4312
Banana Bag	5039
SBR(B)	5698
SBR(C)	5542
SBS(A)	8054
SBS(B)	6069

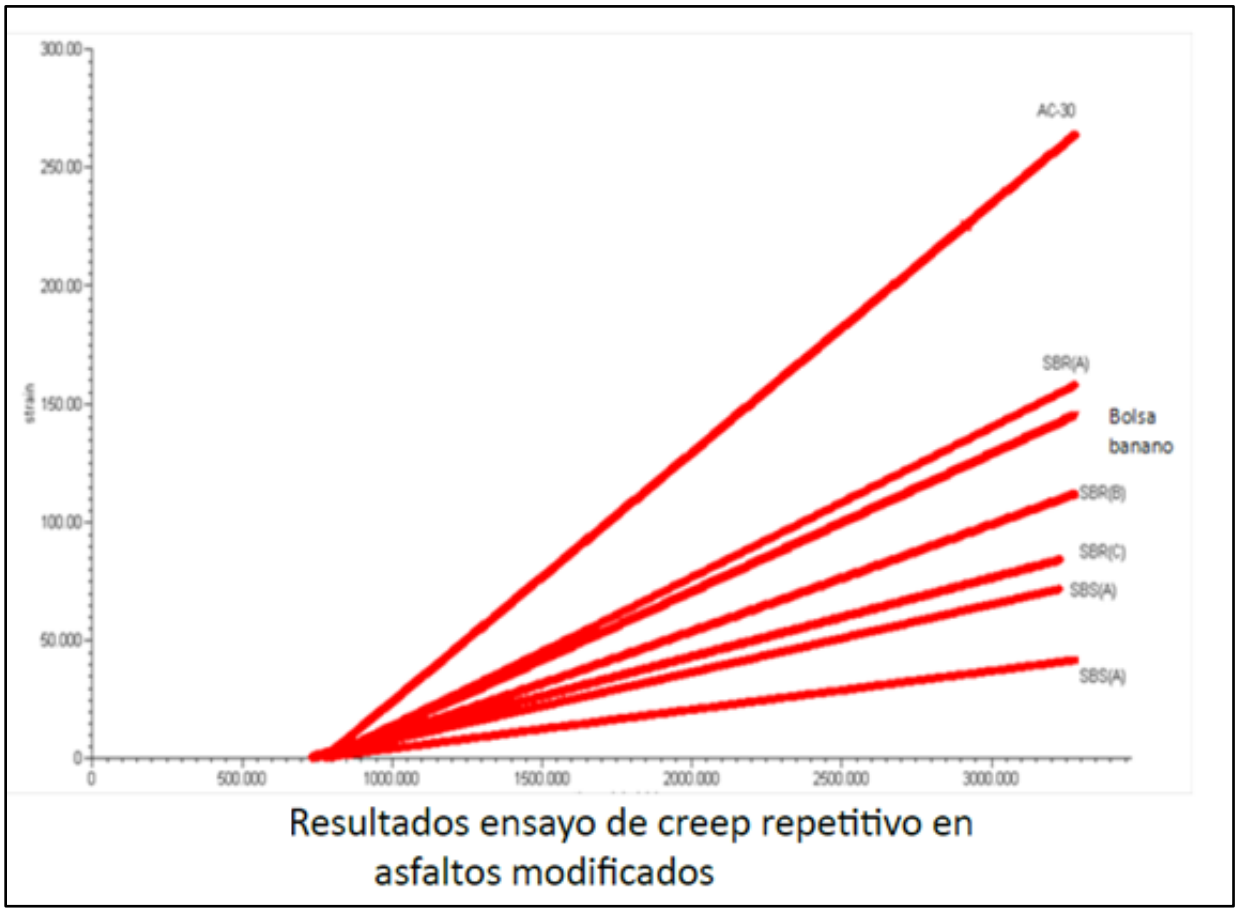
Nota. (Aguiar et al; 2012, pp.7-8).

Análisis Ensayo de Creep Repetitivo

Con el fin de caracterizar la resistencia a la deformación permanente del asfalto modificado, también se realizó el ensayo de creep repetitivo para cuantificar la resistencia a la deformación permanente del asfalto modificado. Durante el ensayo se aplicaron 250 ciclos de carga a 70 °C y se identificó que el material de bolsa de banano incrementa la resistencia a la deformación considerablemente aproximadamente en un 50% cuando se compara con el asfalto sin modificar e inclusive se comporta mejor que el asfalto modificado con uno de los polímeros SBR de casas comerciales (Aguiar et al; 2012, p.8).

Figura 30

Comparación de CREEP repetitivo para diferentes asfaltos sin modificados



Nota. (Aguiar et al; 2012, p.8).

Análisis ensayo de Recuperación por fluencia de Tensiones Múltiples (MSCR)

Este ensayo se realiza bajo condiciones de envejecimiento en el RTFO. Los resultados indican que al adicionar el polímero se pasa de un asfalto que no clasifica según el método (muy bajo volumen vehicular), a un asfalto capaz de soportar tráfico pesado.

Figura 31

Especificaciones y análisis de resultados según MSCR

Polymer	$J_{NR@3.2KPa}$	$(J_{NR@3.2KPa}-J_{NR@0.1KPa})/J_{NR@0.1KPa}$	Condition
LPI-03 (AC-30)	7.344	0.22	NA
SBR (A)	3.896	0.32	Standard Traffic
BANANA BAG	3.180	0.26	Standard Traffic
SBR (C)	3.284	0.37	Standard Traffic
SBS (A)	1.575	0.26	High Traffic
SBS (B)	0.510	0.33	Very High Traffic

Nota. (Aguiar et al; 2012, p.8).

Según Aguiar et al. (2012) concluye qué:

El uso de bolsas de banano como modificador de asfalto resulta prometedor, ya que puede aumentar el grado PG del asfalto en 6 °C y reducir la deformación permanente hasta en un 50 % bajo condiciones normales de tráfico. Esto las hace adecuadas para su aplicación en carreteras de bajo volumen vehicular. En el estudio, se encontró que el polietileno de las bolsas incrementa el grado PG en 12 °C y mejora significativamente la resistencia al ahuellamiento, ampliando el rango de uso del asfalto hacia vías con mayor carga vehicular. Además, se espera que mejore la resistencia a la fatiga y a la flexo-tracción. Su aprovechamiento en lugar de su eliminación por incineración o vertido, permite reutilizar alrededor de 4 kg de plástico por metro cúbico de asfalto. Los análisis térmicos (TGA y DSC) permiten identificar qué polímeros se integran mejor al asfalto y predicen su desempeño durante el servicio (p.10).

2.2.3 Asfalto y Pavimentos Flexibles Modificado con Policloruro de Vinilo (PVC)

Un plástico termoplástico ampliamente utilizado en productos de consumo y construcción, como tuberías, mangueras, juguetes y envases tipo blíster. Debido a su uso masivo, el PVC genera una gran cantidad de residuos, lo que lo convierte en un candidato viable para su reutilización en mezclas asfálticas.

El PVC presenta propiedades que lo hacen adecuado para su incorporación en caliente en mezclas asfálticas. Al ser un termoplástico, es maleable cuando se expone al calor, pasando de un estado sólido a uno viscoso, lo que facilita su fusión con el ligante asfáltico. Al enfriarse, recupera su rigidez, contribuyendo potencialmente a mejorar la resistencia del pavimento.

Los estudios se enfocan en investigar las propiedades mecánicas del pavimento flexible modificado con PVC, específicamente en lo relacionado con la fatiga y la deformación permanente, utilizando el método Superpave como marco de análisis.

2.2.3.1 Análisis del Comportamiento Mecánico de Mezclas Asfálticas Modificadas con PVC Tipo Blíster Reciclado.

En el artículo de la Revista Infraestructura Vial / LanammeUCR, titulado “Evaluación de desempeño de la mezcla asfáltica modificada con residuos de PVC tipo blíster” realizado por José Pablo Aguiar, Alejandra Baldi, Nicole Cajina & Edgar Camacho en el año 2021 presenta una investigación donde se incorporó material de desecho tipo blíster (con polímeros como PVC) en una mezcla asfáltica mediante la vía seca, sustituyendo parte del agregado fino. Se caracterizó el modificante y se definió un porcentaje óptimo para cumplir con la metodología Superpave. Posteriormente, se evaluó el desempeño mecánico de la mezcla modificada mediante pruebas como fatiga a cuatro puntos, rueda de Hamburgo, tensión diametral y módulo dinámico. Al obtener buenos resultados, se analizó su aplicación en diferentes capas de una estructura de pavimento (p.13).

El diseño de la mezcla asfáltica modificada se basó en una mezcla convencional elaborada por el LanammeUCR, que también proporcionó los resultados de referencia para la comparación. Se utilizó la metodología Superpave, considerando parámetros volumétricos como Va, VMA y VFA. El asfalto empleado fue AC-30 (PG 64-22), y el material de desecho tipo blíster se incorporó por vía seca. El blíster, con una densidad de 1,401 g/mL, presentó una granulometría adecuada (91,12 % entre malla No4 y No16), lo que facilitó su mezcla. Se evaluaron tres proporciones de blíster (0,5 %, 1,0 % y 1,5 % en peso del agregado

seco), todas con un contenido de asfalto del 6,32 % PTM, igual al de la mezcla control, para asegurar una comparación precisa (Aguiar et al; 2021, p.15).

Tabla 5

Propiedades volumétricas de la Mezcla de control y mezclas asfálticas modificadas con 0.5%, 1% y 1.5% de blíster.

Parámetros	Mezcla control	Mezcla asfáltica Modificada 0.5%	Mezcla asfáltica Modificada 1%	Mezcla asfáltica Modificada 1.5%
% PTM	6.32	6.32	6.32	6.32
% VTM	4.00	4.3	4.4	5.3
% VMA	14.94	14.9	14.9	15.3
% VFA	73.31	71.2	70.4	65.6
P/A	1.19	1	1.01	1.05

Nota. (Cajina, 2019).

PTM (%): Porcentaje de asfalto por peso total de la mezcla

VTM (%): Porcentaje total de vacíos de la mezcla

VMA (%): Porcentaje de vacíos en el agregado mineral

VFA (%): Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto

P/A: Relación polvo asfalto

A pesar de que la mezcla con 0,5 % presentó un porcentaje de vacíos más cercano al teórico, se decidió utilizar el 1,0 % como porcentaje óptimo para el proyecto; ya que, además de cumplir con los requisitos de diseño de la metodología Superpave, permitió utilizar una mayor cantidad de modificante, dándole un mayor uso a este desecho. Mientras que, si se utilizaba un porcentaje más alto de modificante como lo es el 1,5 %, el volumen total de vacíos se alejaba del teórico (Aguiar et al; 2021, p.16).

Caracterización del Modificante

Se caracterizó el material blíster mediante espectroscopía FTIR, análisis TGA y calorimetría DSC. La FTIR reveló la presencia de polímeros como polimetacrilato, PVC y LDPE. El TGA mostró que el material comienza a perder humedad y volátiles antes de los 200 °C y su descomposición principal ocurre entre

200 °C y 800 °C. El DSC identificó transiciones térmicas entre 50 °C y 120 °C, relacionadas con vitrificación y fusión. Estos análisis confirmaron que el blíster no se degrada ni cambia de fase a 160 °C, por lo que es adecuado para mezclas asfálticas en condiciones normales de producción y colocación (Aguiar et al; 2021, p.17).

Desempeño de la Mezcla Asfáltica Modificada

Análisis Fatiga a Cuatro Puntos

La prueba de fatiga a cuatro puntos (AASHTO T 321-17) consiste en someter a flexotracción repetidamente una viga con el propósito de alcanzar la fatiga y determinar los ciclos de falla (AASHTO, 2017). Para la mezcla control y modificada, el ensayo se realizó a deformaciones controladas, 400 micro strain y 600 micro strain y a una temperatura de 20 ºC. Esto con el propósito de verificar el cumplimiento de los requisitos de desempeño y aceptación de diseño, del Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes de Costa Rica (CR-2010).

Los datos reflejan que, para ambas deformaciones controladas, la mezcla modificada presenta una rigidez inicial mayor. Además de una mayor pérdida de rigidez, lo que se asocia a que esta mezcla requiera de una mayor cantidad de ciclos para alcanzar la falla (Aguiar et al; 2021, pp.17-18).

Figura 32

Resultados promedio del ensayo de fatiga a deformación controlada

Deformación	400 micro strain		600 micro strain	
Mezcla	**Modificada**	**Control**	**Modificada**	**Control**
Rigidez inicial (MPa)	**7296**	6513	**6881**	6326
Rigidez en ciclo de falla (MPa)	2955	**3380**	1991	**3264**
Nº Ciclos para la falla	**524077**	190149	**59295**	19461

Nota. (Aguiar et al; 2021, p.17).

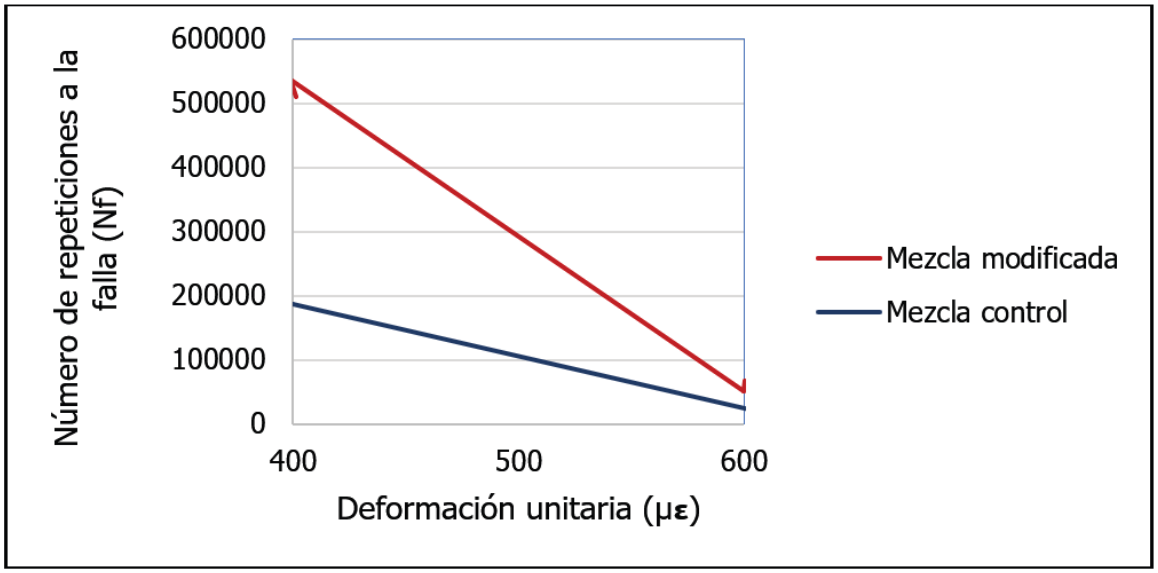
También, se observa que la mezcla modificada es más susceptible a cambios en las deformaciones unitarias generadas por cargas, donde se ilustra que la mezcla modificada posee un comportamiento

óptimo a fatiga para los estados de deformación analizados; ya que, para alcanzar un mismo estado de deformación, la mezcla requiere una mayor cantidad de ciclos.

Se debe recalcar que según las especificaciones del CR-2010, la mezcla modificada cumple los ciclos promedio para la falla por fatiga para los niveles de deformación unitaria controlada en mezclas asfálticas de alto desempeño (mezcla C aplicadas en capas asfálticas intermedias y mezcla D aplicadas en capas asfálticas de rodadura, ambas para un alto volumen de tránsito, es decir, más de tránsito, es decir, más de 10 millones ESAL´s), mientras que la de control no lo hace (Aguiar et al; 2021, p.17).

Figura 33

Deformación unitaria contra número de repeticiones a la falla



Nota. (Aguiar et al; 2021, p.18).

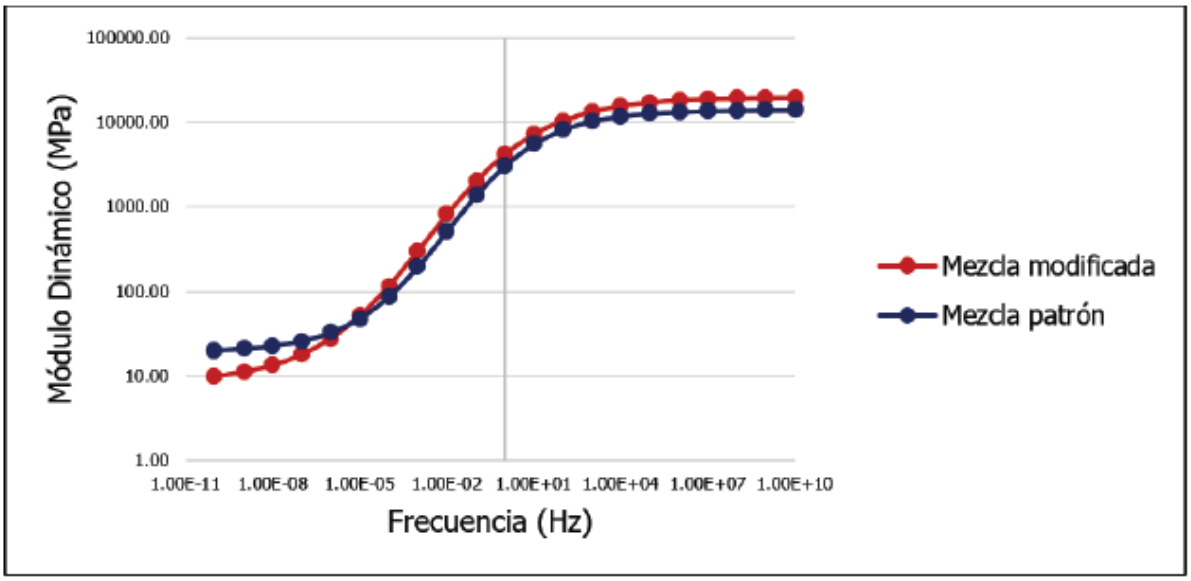
Análisis Módulo Dinámico

El ensayo de módulo dinámico (según normas ASTM D3496, D3497 y AASHTO TP62) se utiliza para evaluar las propiedades elásticas de mezclas asfálticas. Consiste en aplicar un esfuerzo de compresión axial de forma sinusoidal a temperaturas y frecuencias específicas, midiendo la deformación resultante para calcular el módulo dinámico. Los valores obtenidos permiten construir una curva maestra, que muestra el comportamiento de la mezcla frente a distintas frecuencias, usando una temperatura de referencia

(21,1 °C en este estudio). Los resultados indicaron que la mezcla modificada presentó en general módulos dinámicos más altos que la mezcla control, lo cual refleja una menor deformación bajo iguales condiciones de esfuerzo. A frecuencias elevadas, la mezcla modificada mostró mayor rigidez que la mezcla convencional, mientras que a frecuencias muy bajas la situación se invirtió. Por ejemplo, a una frecuencia de 1,00E-10, la mezcla modificada presentó un 51 % menos de rigidez, y a 1,00E10, un 40 % más. No obstante, estos valores en los extremos de la curva provienen de extrapolaciones, por lo que no se consideran críticos al comparar el rendimiento general entre mezclas (Aguiar et al; 2021, p.18).

Figura 34

Curvas maestras de la mezcla control y la mezcla modificada



Nota. (Aguiar et al; 2021, p.18).

Análisis Rueda de Hamburgo

El ensayo de Rueda de Hamburgo (AASHTO T 324-19) evalúa la resistencia de una mezcla asfáltica a la deformación permanente y al daño por humedad, sometiendo especímenes a cargas repetitivas mientras están sumergidos en agua. La profundidad de impresión indica la deformación, y el punto de inflexión marca el inicio del daño por humedad: cuanto más ciclos se requieren para alcanzarlo, mejor es el

desempeño de la mezcla. En este estudio, la mezcla modificada mostró una profundidad de impresión inferior a los 20 mm, permitiendo que el ensayo continuara hasta los 20 000 ciclos. En cambio, la mezcla control superó esta profundidad antes, terminando la prueba alrededor de los 10 000 ciclos. Además, el punto de inflexión en la mezcla control ocurrió con aproximadamente la mitad de ciclos que en la modificada, lo que evidencia que la mezcla modificada tiene mayor resistencia a la deformación y a la humedad (Aguiar et al; 2021, p.19).

Figura 35

Impresión máxima y cantidad de ciclos del punto de inflexión

Mezcla	Grupo	Impresión máxima (mm)	Número de pasadas	Profundidad de falla (20 mm)	Ciclos del punto de inflexión
Modificada	Llanta izquierda	-20,45	19950	Falla	12785
	Llanta derecha	-12,66	19950	Pasa	
	Promedio	**-16,55**	-	**Pasa**	
Control	Llanta izquierda	-20,03	10005	Falla	5929
	Llanta derecha	-20,10	10579	Falla	
	Promedio	**-20,06**	-	**Falla**	

Nota. (Aguiar et al; 2021, p.19).

Análisis Resistencia Retenida a la Tensión Diametral (RRTD)

El ensayo RRTD (AASHTO T283, ASTM D4867) evalúa la susceptibilidad de una mezcla asfáltica al daño por humedad, midiendo cómo afecta el agua su resistencia a la tracción. Para ello, se comparan especímenes en condiciones secas y parcialmente saturadas, aplicándoles una carga hasta que fallan. A partir de las cargas máximas registradas, se calcula qué porcentaje de resistencia retienen las muestras saturadas respecto a las secas. En los resultados obtenidos, la mezcla modificada mostró una mayor carga máxima promedio en ambas condiciones, así como una resistencia retenida a la tracción diametral superior, lo que indica mejor comportamiento frente a la humedad en comparación con la mezcla control (Aguiar et al; 2021, p.19).

Figura 36

Resultados de Resistencia Retenida a la Tensión Diametral

Condición Seca		
Mezcla	Modificada	Control
Promedio de carga máx (N)	**21156**	15048
Condición Saturada		
Mezcla	Modificada	Control
Promedio del % Saturación	**76,7**	75,7
Promedio de carga máx (N)	**18729**	12573
Promedio RRTD (%)	**88,6**	84,0

Nota. (Aguiar et al; 2021, p.19).

Según Aguiar et al. (2021) concluye qué:

Los resultados obtenidos en los ensayos de desempeño indican que la mezcla asfáltica modificada con blíster es menos susceptible a la deformación permanente en comparación con la mezcla convencional. Además, el daño por humedad ocurre después de un mayor número de ciclos en la mezcla modificada, y esta también resiste mayores cargas, lo que demuestra un mejor comportamiento mecánico general. Estos resultados sugieren que esta mezcla es adecuada para ser usada en capas superficiales del pavimento.

Sin embargo, se debe considerar que la fuente de agregado empleada en este estudio, según el LanammeUCR, presenta alta susceptibilidad al daño por humedad en comparación con otras fuentes del país. Aun así, la mezcla modificada mostró una deformación inferior a la mezcla control bajo el mismo estado de esfuerzo, y requirió una mayor cantidad de ciclos de carga para alcanzar la falla por fatiga. Por esta razón, también se recomienda su uso en capas inferiores.

La mezcla modificada cumple con los requisitos del CR-2010 (MOPT, 2017) para mezclas de alto desempeño, por lo tanto, es apta para su aplicación en carreteras de alto tránsito. Además, la incorporación del 1% de blíster (material con una densidad de 2,4 t/m^3) en estas mezclas asfálticas representa una solución ambiental significativa. Se le da un nuevo uso a un desecho plástico de difícil reciclaje,

contribuyendo a la reducción de la contaminación. Por ejemplo, en la construcción de un kilómetro de carretera con dos carriles de 3,6 metros de ancho y 5 cm de espesor, se requerirían aproximadamente 863 toneladas de mezcla asfáltica, de las cuales unas 8 toneladas podrían ser de blíster reciclado (p.20).

2.2.4 Asfalto y Pavimentos Flexibles Modificado con Plástico Peletizado / Polietileno de baja densidad (LDPE)

En el contexto de la búsqueda de soluciones sostenibles para la construcción vial, uno de estos materiales es el polietileno de baja densidad (LDPE), un termoplástico derivado del etileno que se caracteriza por su buena resistencia térmica y química, así como por su flexibilidad y facilidad de procesamiento. Su presentación en forma de plástico peletizado facilita su incorporación en caliente en las mezclas asfálticas.

La investigación recopila y se enfoca en el comportamiento mecánico del pavimento flexible modificado con LDPE, centrándose en parámetros evaluados mediante el método Marshall, como la estabilidad, el flujo y el porcentaje de vacíos. El objetivo es determinar el efecto del LDPE reciclado sobre estas propiedades y su viabilidad como aditivo en el diseño de mezclas asfálticas más durables y ecológicas.

2.2.4.1 Evaluación del Comportamiento Mecánico de Mezclas Asfálticas con LDPE Peletizado según el Ensayo Marshall).

En el año 2019 Cecilio Nicanor Delgado & Silver Jhonatan Solano en su tesis titulada “Análisis de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente con la adición de plástico peletizado LDPE-2019”. Se investigó el efecto que causa las distintas proporciones (3%,6% y 9%) de plástico peletizado LDPE en la mezcla asfáltica en caliente. Inicialmente se elaboró un diseño de mezcla asfáltica en caliente sin adición de LDPE, que sirviera como patrón de referencia para ello, se prepararon 12 briquetas con distintos % de asfalto. Posteriormente, se realizó 3 diseños con asfalto modificado con % distintas de LDPE, produciendo una cantidad de 36 briquetas. En total se realizaron el Ensayo Marshall para las 48 briquetas

para determinar la estabilidad y flujo en la cual nos ayudaran a conocer el óptimo contenido de asfalto (p.8).

Tabla 6

Resultados para la mezcla asfáltica convencional y modificada.

Parámetros	MAC convencional	Mezcla asfáltica Modificada 3%	Mezcla asfáltica Modificada 6%	Mezcla asfáltica Modificada 9%
% Plástico	-	3	6	9
% Asfalto	5.8	6	5.78	6.5
Estabilidad (kg)	1200	1067	1380	1703
% Vacíos	4	9.7	4	5.7
Flujo (mm)	12.3	12.9	13.6	12.3
Factor de rigidez (kg/ cm^2)	3840.98	3319.30	3994.41	5529.2

Nota. (Delgado & Solano, 2019).

PTM (%): Porcentaje de asfalto por peso total de la mezcla

VTM (%): Porcentaje total de vacíos de la mezcla

VMA (%): Porcentaje de vacíos en el agregado mineral

VFA (%): Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto

P/A: Relación polvo asfalto

Delgado & Solano 2019 concluye que:

La investigación realizada evidenció que al incorporar un 6% de plástico peletizado LDPE en la mezcla asfáltica, la estabilidad aumentó en un 15% respecto a la mezcla convencional sin plástico. En cuanto al flujo, no se detectaron cambios significativos frente a la mezcla patrón. Este aumento en la estabilidad sugiere un mejor desempeño ante cargas de tránsito y altas temperaturas, extendiendo así la vida útil del pavimento, ya que la mezcla necesitaría mayores cargas para sufrir deformaciones. Además, la Rigidez Marshall también mostró una mejora del 4% con la adición del 6% de plástico, lo que contribuiría a prevenir fallas como el ahuellamiento o deformaciones permanentes.

La mezcla asfáltica modificada cumplió con los requisitos de las Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (EG-2013), presentando valores de 1380 kg de estabilidad, 3.45 mm de flujo, 3994.91 kg/cm de rigidez Marshall, 4% de vacíos de aire y 15.05% de V.M.A, con un contenido óptimo de asfalto del 5.8%. Por comparación, la mezcla patrón alcanzó una estabilidad de 1200 kg, un flujo de 3.12 mm, una rigidez Marshall de 3840.98 kg/cm, 4% de vacíos de aire y 16.35% de V.M.A. (pp.60-61).

2.2.5 Asfalto y Pavimentos Flexibles Modificado con Polipropileno (PP), PVC y Bumper de Autos

Diversas investigaciones han abordado la incorporación de plásticos reciclados en mezclas asfálticas como alternativa para mejorar el desempeño mecánico del pavimento flexible y reducir el volumen de residuos. El polipropileno (PP), un termoplástico presente en productos como billetes de mil colones, tapas de botellas, bolsas y componentes automotrices, destaca por su abundancia en los desechos sólidos, especialmente en países como Costa Rica, lo que facilita su disponibilidad para uso a gran escala.

También se ha explorado el aprovechamiento de materiales provenientes de parachoques de vehículos, los cuales contienen mezclas de polímeros como polipropileno reforzado, policarbonato, poliéster termoplástico y poliuretano, entre otros. Aunque su composición puede variar, estos residuos representan un recurso potencial para la modificación del asfalto mediante el método Superpave.

2.2.5.1 Impacto del Polipropileno y Bumper Reciclado en el Desempeño de Mezclas Asfálticas

En la investigación desarrollada por José Pablo Aguiar, Laura Marcela Cruz, Luis Guillermo Loria, Alejandro Porras & Adriana Vargas en el año 2015 llamada “Materiales de Desecho como Modificantes de la Mezcla Asfáltica” se realiza un análisis y comparación de mezclas asfálticas originales y modificadas con materiales de desecho, tales como: el bumper (desecho de parachoques de automóviles) y el polipropileno, con el fin de contribuir a la reutilización de este tipo de desechos y directamente mejorar el desempeño de las mezclas asfálticas.

La investigación se fundamenta en la caracterización del asfalto modificado y la posterior verificación del desempeño en la mezcla asfáltica diseñada según la metodología Superpave. El

asfalto modificado fue diseñado para determinar un contenido mínimo idóneo de modificante (material de desecho). Con base en el contenido óptimo, se verificaron las propiedades básicas del asfalto, así como su resistencia a la deformación y a la fatiga mediante ensayos reológicos utilizando el reómetro dinámico de cortante (DSR).

A nivel de mezcla asfáltica se realizaron ensayos de deformación permanente con el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA), se verificó la rigidez de la mezcla mediante evaluación del Módulo Resiliente a la Tensión Indirecta y se estudió la resistencia al daño por humedad con base en la Resistencia Retenida a la Tensión Diametral (p.634).

Según Aguiar et al. (2015) El bumper se debe triturar en un equipo especializado para reducir el tamaño de partícula. Se tamiza en las mallas N° 8 (2,36 mm) y N° 16 (1,18 mm). Las partículas retenidas en la malla N°16 tienen un tamaño de partícula adecuado para realizar las modificaciones. El polipropileno utilizado corresponde a fibras finas por lo que no requiere de preparación adicional.

Los porcentajes de polímero utilizado se presentan con base en la relación masa/masa, por peso de asfalto, así como considerando la trabajabilidad y apariencia del asfalto modificado, el contenido óptimo de los materiales de desecho para modificar un asfalto PG64-22 (AC-30) de uso común en Costa Rica fue de 2% para el bumper y 1.5% para el polipropileno (pp. 635-636).

Una vez determinado los porcentajes de plásticos reciclados se procede a realizar ensayos reológicos como: ensayo de película delgada en horno rotatorio (RTFO), cámara de envejecimiento a presión (PAV) determinación del grado de desempeño PG.

Como se puede observar en la figura 37 el asfalto original cumple con la especificación únicamente para una temperatura de 64°C en el asfalto sin envejecer y envejecido en RTFO. Al ángulo de fase (δ) menor el G*/sen incrementa (mayor aporte del componente elástico).

El asfalto modificado con 1,5 % de polipropileno fue analizado a una de temperatura de 70°C y 76°C. Es clasificado como un PG 70. El PG 76 no cumple con los requerimientos, por lo que es innecesario

hacer una medición a una temperatura mayor, como por ejemplo 82°C. Adicionalmente, dicha temperatura no es recomendada, pues un PG 82 es un ligante demasiado rígido. Para el asfalto modificado con 2% de bumper se realizaron mediciones a temperaturas de 64°C, 70°C, 76°C, las cuales cumplen con el parámetro ≥ 1,00 kPa (Aguiar et al; 2015, p. 637).

La temperatura intermedia que cumple con la especificación Superpave, para el asfalto original corresponde a 25°C. Para el asfalto modificado con bumper la temperatura intermedia es de 25°C y para el polipropileno 28°C.

Figura 37

Clasificación PG Alta e Intermedia del Asfalto Original y Modificado.

Asfalto	Ensayo		Método de ensayo		Resultados (kPa)	Límite Superior
			AASHTO	ASTM		
Sin Envejecer						
Original	G*/senδ	64°C	T 315	P 246	1,91	64
1,5% Polipropileno	G*/senδ	70°C			1.69	70
2,0% Bumper	G*/senδ	76°C			1.42	76
Envejecido RTFO						
Original	G*/senδ	64 °C	T 315	P 246	5,17	64
1,5% Polipropileno	G*/senδ	70°C			3,76	70
2,0% Bumper	G*/senδ	76°C			2,38	76
Temperatura Intermedia						
Original	G*senδ	25 °C	T 315	P 246	$4,81x10^3$	25
1,5% Polipropileno	G*senδ	28 °C			$4,48x10^3$	28
2,0% Bumper	G*senδ	25 °C			$4,65x10^3$	25

Nota. (Aguiar et al; 2015, p. 637).

Según Aguiar et al. (2015) al analizar los ensayos de fatiga que fueron desarrollados. El análisis se realizó a 25 °C usando una frecuencia angular de 10 rad/s, bajo deformación controlada (10%), según las recomendaciones de NCHRP 459: la temperatura escogida corresponde a la base del grado PG para una temperatura intermedia con la que todos los asfaltos cumplan.

Según las pruebas realizadas, el asfalto original tiene una mayor resistencia a la fatiga, pues lo que se espera obtener es un mayor lapso antes de que ocurra la falla. De los asfaltos modificados, el que tarda

más tiempo en fallar es el asfalto modificado con bumper, aunque ambos materiales de desecho tienen un comportamiento muy similar. Es decir, la incorporación de los polímeros en al asfalto no mejora fatiga (pp. 638-639).

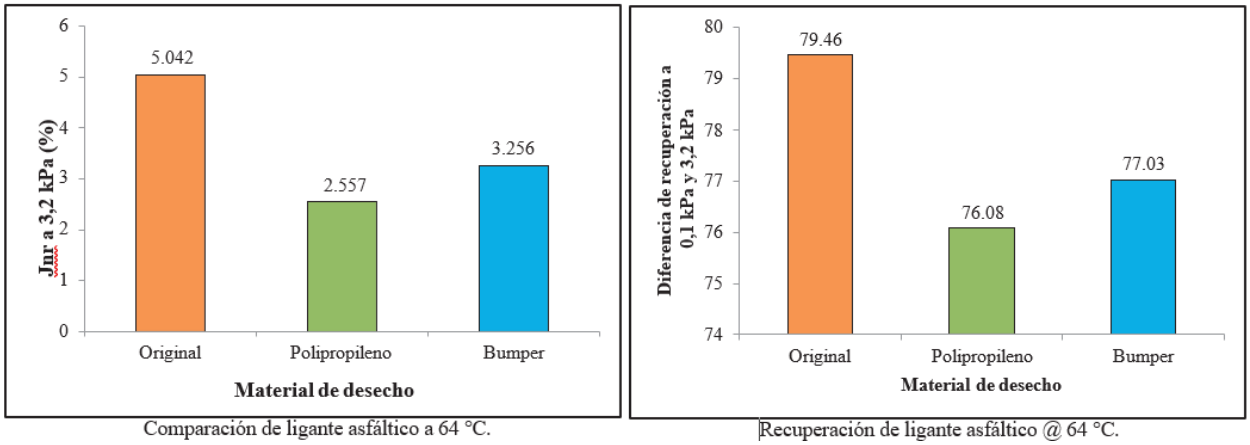
Análisis de Múltiple Stress Creep and Recovery (MSCR) en el Asfalto

Según Aguiar et al. (2015) muestra la relación entre la deformación no recuperable como función del tiempo y el esfuerzo aplicado (Jnr), lo que hace esperar que entre más bajo sea el valor de Jnr, menor va a ser la deformación permanente al aplicar una carga. Por lo tanto, el polipropileno presenta mejores resultados en comparación con el asfalto original y el asfalto modificado con bumper.

La diferencia entre la respuesta elástica a 0,1 kPa y 3,2 kPa, es un parámetro que garantiza que la estructura del asfalto sea resistente y estable al recibir una carga. El asfalto original es el que presenta una mayor elasticidad, seguido por el asfalto modificado con bumper y polipropileno, respectivamente. Sin embargo, si se realiza una comparación entre los asfaltos modificados se determina que el bumper presenta un mayor rendimiento en la recuperación elástica que el polipropileno (pp. 639-640).

Figura 38

Resultados MSCR entre ligante asfaltico original vs modificados con PP y Bumper



Comparación de ligante asfáltico a 64 °C.

Recuperación de ligante asfáltico @ 64 °C.

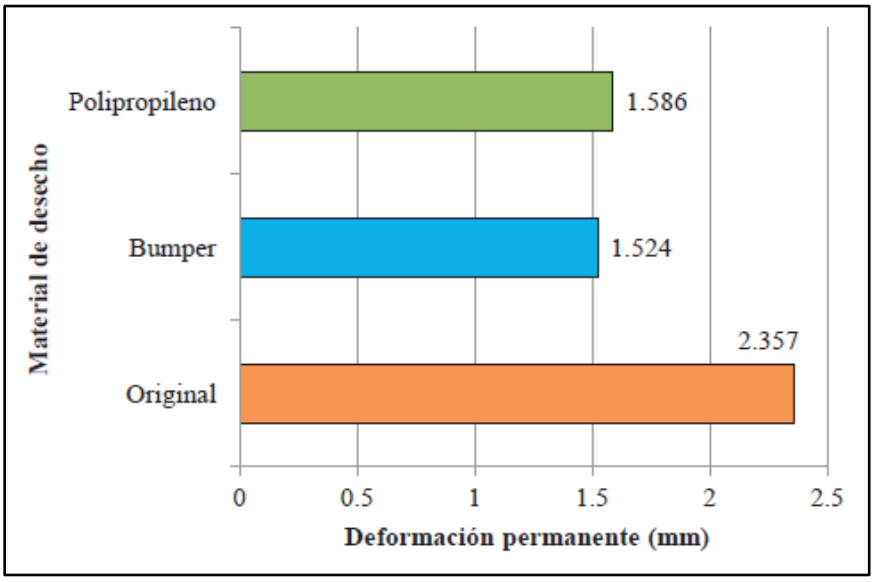
Nota. (Aguiar et al; (2015, p.639).

Ensayo Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA)

En la siguiente figura se puede apreciar una notable reducción en la deformación permanente en las mezclas asfálticas modificadas con respecto a la mezcla asfáltica de control. Es decir, la incorporación de los materiales de desecho al asfalto cumple la función de rigidizar la mezcla asfáltica y de esta manera aumentar la capacidad de respuesta de los especímenes modificados ante la carga aplicada en el ensayo. Según los requisitos establecidos para mezclas asfálticas en Costa Rica, las tres mezclas anteriores se designan tipo C, puesto que la deformación plástica luego de 8000 ciclos de carga a 60 °C debe ser ≤ 3,00 mm, según lo indicado en la norma AASHTO T340. Por tanto, las mezclas modificadas con materiales de desecho pueden ser consideradas para uso en capas de ruedo donde se puede presentar problemas de deformación permanente (Aguiar et al; 2015, p.641).

Figura 39

Resultados APA para mezcla asfáltica modificada con material de desecho plástico



Nota. (Aguiar et al; 2015, p.641).

Análisis Resistencia Retenida a la Tensión Diametral

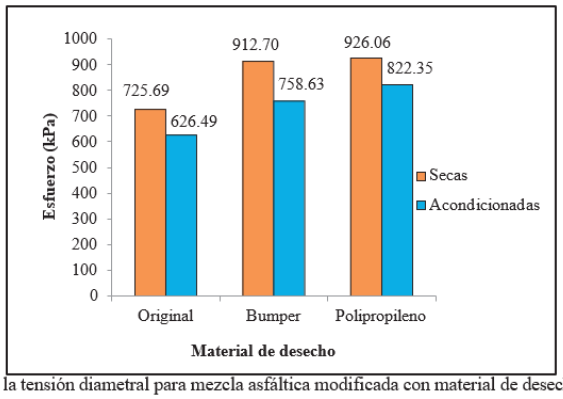
Según Aguiar et al. (2015) los especímenes secos y acondicionados en estado modificado tienden a aumentar su capacidad de respuesta ante los esfuerzos aplicados en relación a los especímenes con

asfalto original, debido a la incorporación de los agentes modificantes. Como es de esperarse, las tres mezclas asfálticas acondicionadas disminuyen su capacidad de resistencia a los esfuerzos de tensión, pues el agua está induciendo un deterioro a nivel de adhesión asfalto- agregado y posiblemente a nivel de cohesión interna del mastic asfáltico. Según el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes, la resistencia a la tensión diametral a 25 °C en especímenes secos debe ser mayor o igual a 700 kPa, lo cual las muestras cumplen satisfactoriamente este parámetro. Otro parámetro requerido por la especificación es el porcentaje de la resistencia retenida a la tensión diametral, el cual debe ser mayor al 85%. La resistencia retenida busca garantizar que la mezcla asfáltica no se degrade considerablemente en presencia de humedad.

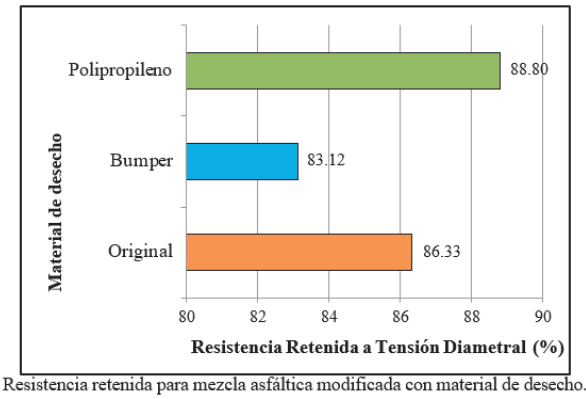
La mezcla asfáltica sin modificar y la modificada con polipropileno sobrepasan la especificación de resistencia retenida. Por su parte, la mezcla asfáltica con bumper, presenta un porcentaje de 83,12 %, encontrándose por debajo de la condición mencionada. Por lo tanto, el bumper está afectando el trabajo de adhesión asfalto-agregado de manera que la humectabilidad del agregado se ve reducida. Lo contrario ocurre con el polipropileno que demuestra un aumento en la resistencia al daño por humedad (pp. 642-643).

Figura 40

Resultados RTD para mezcla asfáltica modificada con material de desecho plástico



Falla a la tensión diametral para mezcla asfáltica modificada con material de desecho.



Resistencia retenida para mezcla asfáltica modificada con material de desecho.

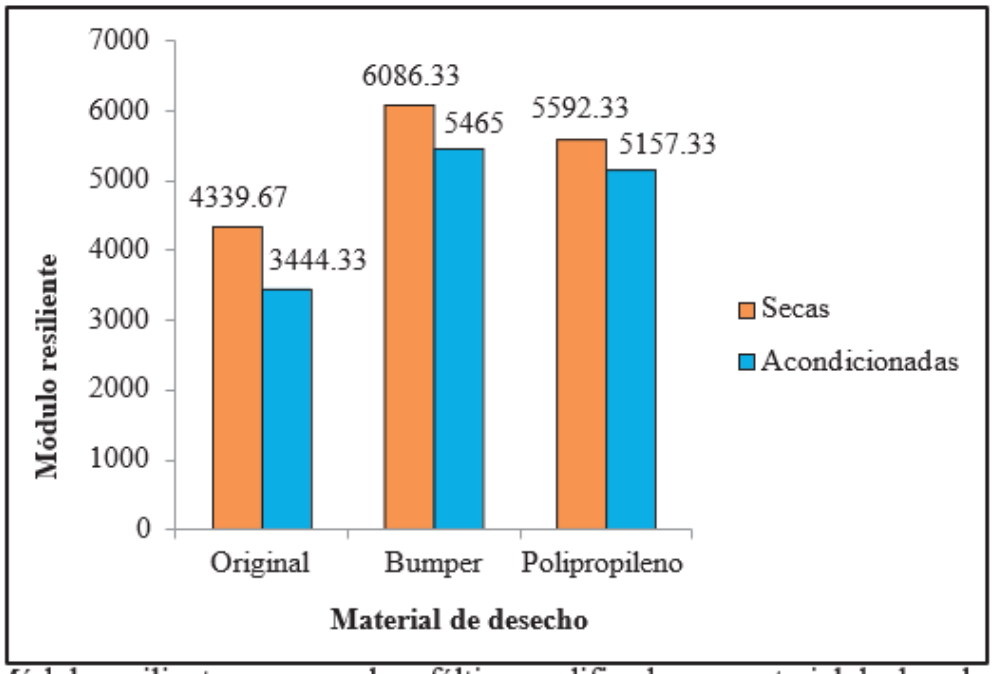
Nota. (Aguiar et al; 2015, pp.642-643).

Análisis Módulo Resiliente a Tensión Diametral

Según Aguiar et al. (2015), Como se puede observar en la figura 41, corrobora el incremento en resistencia ante esfuerzos, dado el aumento del módulo resiliente del material modificado con respecto a la mezcla asfáltica con asfalto original. Adicionalmente, se puede observar que el material de desecho también reduce la afectación del agua ante el módulo resiliente (lo vuelve menos susceptible): se pasa de un módulo retenido de 79,5% (asfalto original), a un módulo retenido de 89,8% y 92,2% para las mezclas con asfalto modificado con bumper y polipropileno, respectivamente (p.463).

Figura 41

Resultados Análisis Módulo Resiliente a Tensión Diametral para mezcla asfáltica modificada con material de desecho plástico



Módulo resiliente para mezcla asfáltica modificada con material de desecho.

Nota. (Aguiar et al; 2015, p.643).

Según Aguiar et al. (2015) concluye qué:

El asfalto base PG64-22 modificado con 2% de bumper alcanza un grado PG 76(25)-22, mientras que con 1,5% de polipropileno se obtiene PG 70(28)-22. El asfalto con bumper es adecuado para zonas de

tránsito medio (10-20 millones de ejes equivalentes) y baja velocidad, pero no cumple con los requisitos de resistencia retenida bajo humedad, por lo que se recomienda en áreas de baja precipitación. En cambio, el asfalto modificado con polipropileno es más resistente a la humedad, lo que lo hace apto para regiones con alta precipitación y alto tránsito (≥20 millones de ejes). Ambos polímeros aumentan la rigidez y la resistencia del asfalto frente a la mezcla original, y aunque no hay diferencias claras en el rendimiento entre los dos modificadores, la elección puede basarse en factores económicos. El polipropileno destaca como el mejor modificador por su menor susceptibilidad a la humedad y mejor desempeño general en pruebas de deformación (pp.643-644).

2.2.5.2 Caracterización y Desempeño del Asfalto Modificado con PVC y PP Provenientes de Billetes.

Según Fernando Villacís en el año 2017 presentó en su tesis titulada *"Asfalto Modificado con Materiales de Desecho"* explora, la viabilidad de utilizar polipropileno (PP) y policloruro de vinilo (PVC), presentes en billetes fuera de circulación, específicamente los de mil colones que dejan de ser utilizados y son almacenados en las bodegas del Banco Central de Costa Rica como modificantes del asfalto. Se caracterizan las propiedades de estos polímeros, se evalúa su incorporación en la mezcla asfáltica y se realizan ensayos de desempeño para identificar los cambios respecto al asfalto convencional. Con los resultados obtenidos, se determina si estos materiales pueden ser utilizados como modificantes y bajo qué condiciones su uso es recomendable (pp.10-11).

Análisis de resultados de los Materiales (PVC) y (PP)

Se compara el desempeño del asfalto sin modificar con el asfalto modificado con los dos materiales descritos. Inicialmente se va a evaluar la incorporación de los materiales en el asfalto a nivel microscópico con la técnica de Espectroscopia infrarroja con trasformada de Fourier, (FTIR) como análisis químico cualitativo y luego con microscopia de fuerza atómica (AFM)

Espectroscopia Infrarroja con Trasformada de Fourier (FTIR) del PVC y Billetes de PP

Se observa el espectro infrarrojo del asfalto sin modificar, y del asfalto modificado con PVC molido en el molino (azul). Las últimas cuatros bandas en el espectro del asfalto son las que deberían mostrar un cambio mayor si el modificante se incorporó al mismo.

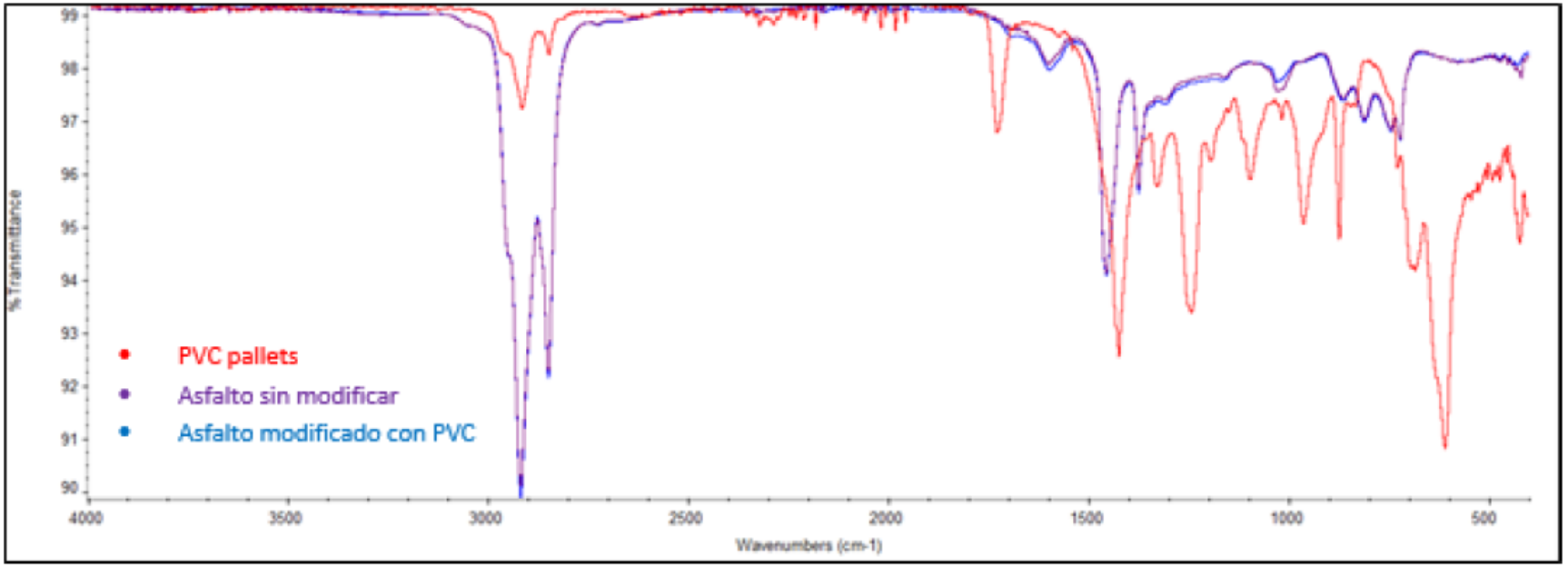
En la figura 42 se puede observar que el asfalto sin modificar y el asfalto modificado con los pallets de PVC molido, presentan prácticamente el mismo espectro pues no tiene cambios significativos y por lo tanto, el PVC no se incorporó al asfalto.

En el espectro del asfalto sin modificar de los billetes y del asfalto modificado con billetes (verde). En esta se puede observar que el asfalto presenta un cambio significativo alrededor de los 1500 $cm{-}1$, que se encuentra dentro de la región que representa una incorporación del modificante en el asfalto (Villacís, 2017, pp.49-50 y 52).

En las siguientes figuras se muestra la comparación de los resultados de FTIR para el asfalto sin modificar y el modificado con pallets de PVC molido y PP

Figura 42

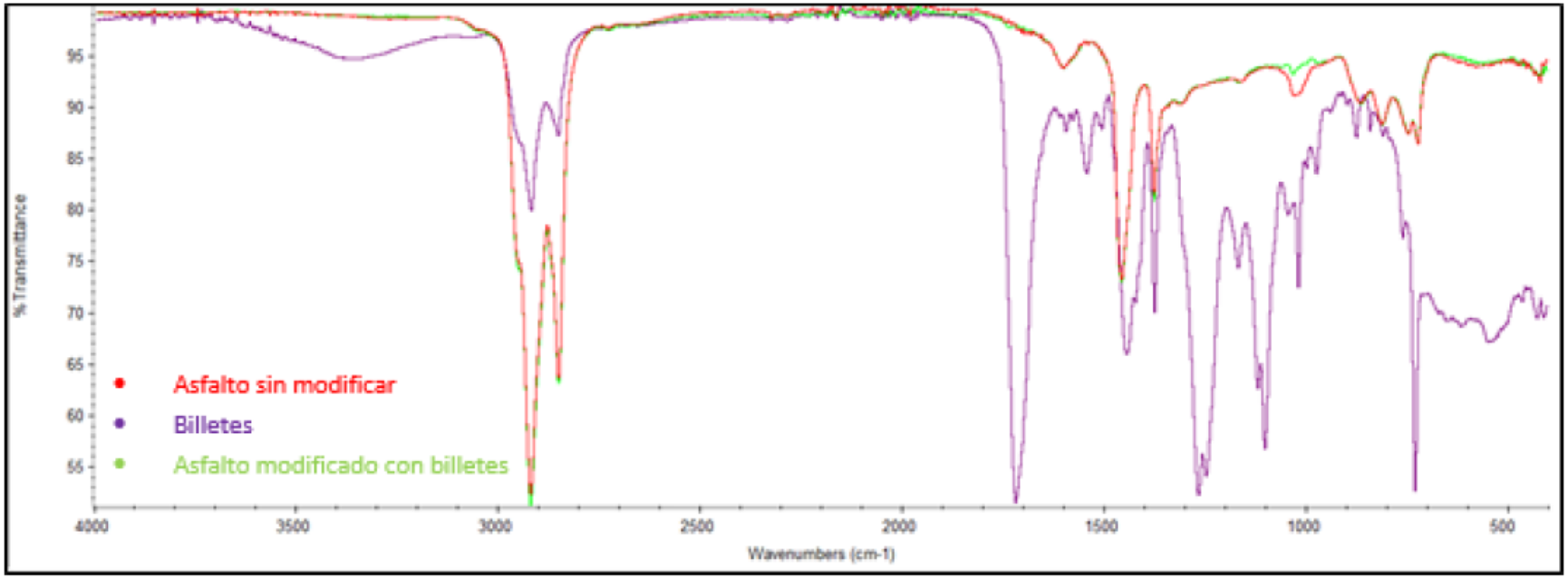
Comparación de los resultados de FTIR para el asfalto sin modificar y el modificante con pallets de PVC molido



Nota. (Villacís, 2017, pp.49-52).

Figura 43

Comparación de los resultados de FTIR para el asfalto sin modificar y el modificado con PP



Nota. (Villacís, 2017, pp.49-52).

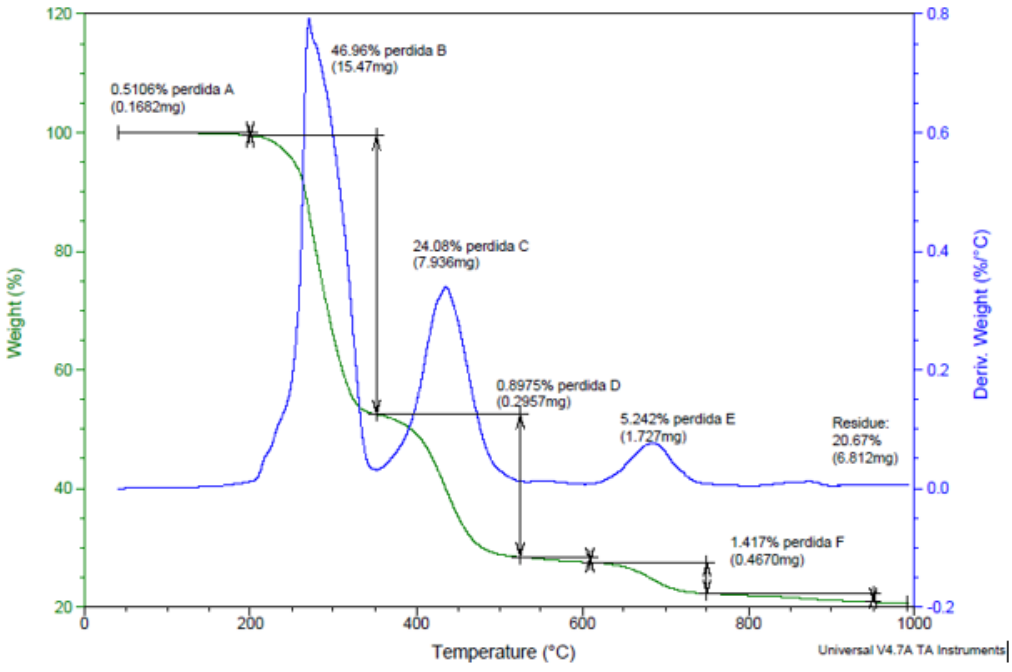
Análisis Termogravimétrico (TGA) del PVC y billetes de PP

Según Villacís (2017) “esto se hace con el fin de comprobar que el modificante no se degrada a una temperatura menor a la temperatura de trabajo de la muestra y por lo tanto, se puede utilizar como modificante.” (p.39).

El PVC molido en forma de pallets muestra una degradación más variable debido a la diversidad en tamaños y formas de sus componentes, comenzando su pérdida de masa a partir de los 200 °C, lo cual indica que no libera compuestos clorados si se incorpora en seco, ya que no hay pérdidas significativas antes de los 185 °C. Por otro lado, los billetes de polipropileno (PP) inician una leve degradación después de los 100 °C, con una pérdida significativa cerca de los 400 °C. Ambos materiales presentan una temperatura de degradación superior a la temperatura típica de preparación de mezclas asfálticas (150 °C), lo que asegura que no habrá pérdida de material durante el proceso de mezclado (Villacís, 2017, pp.40-45).

Figura 44

Resultados Análisis Termogravimétrico (TGA) del PVC

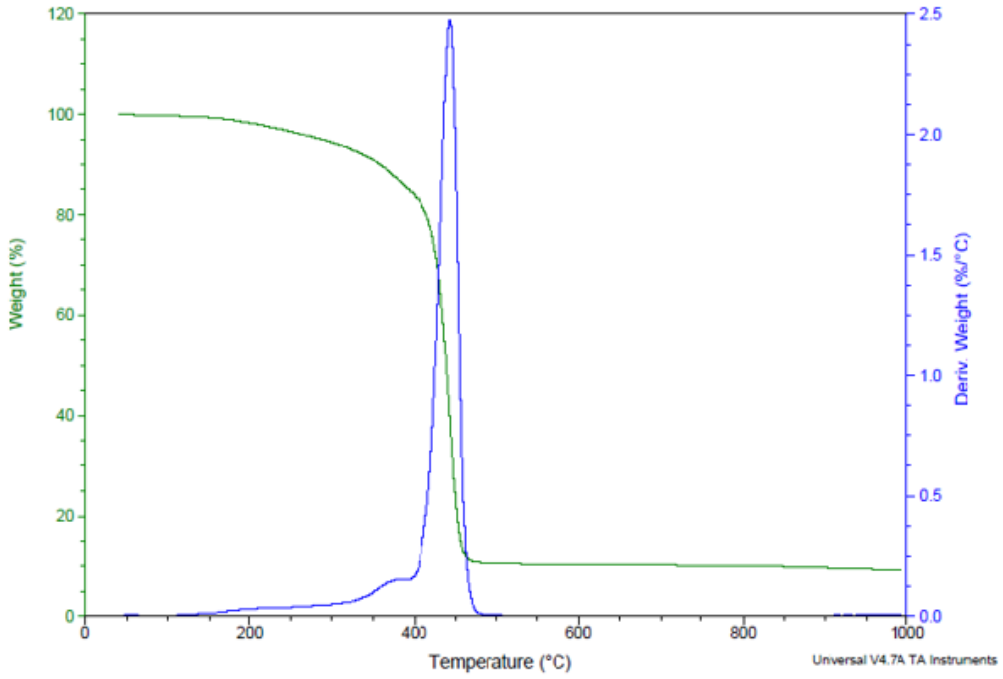


Resultados de las pruebas de TGA para las pallets de PVC molido.

Nota. (Villacís, 2017, pp.40-45).

Figura 45

Resultados Análisis Termogravimétrico (TGA) billetes de PP



Resultados de las pruebas de TGA para los billetes de mil colones.

Nota. (Villacís, 2017, pp.40-45).

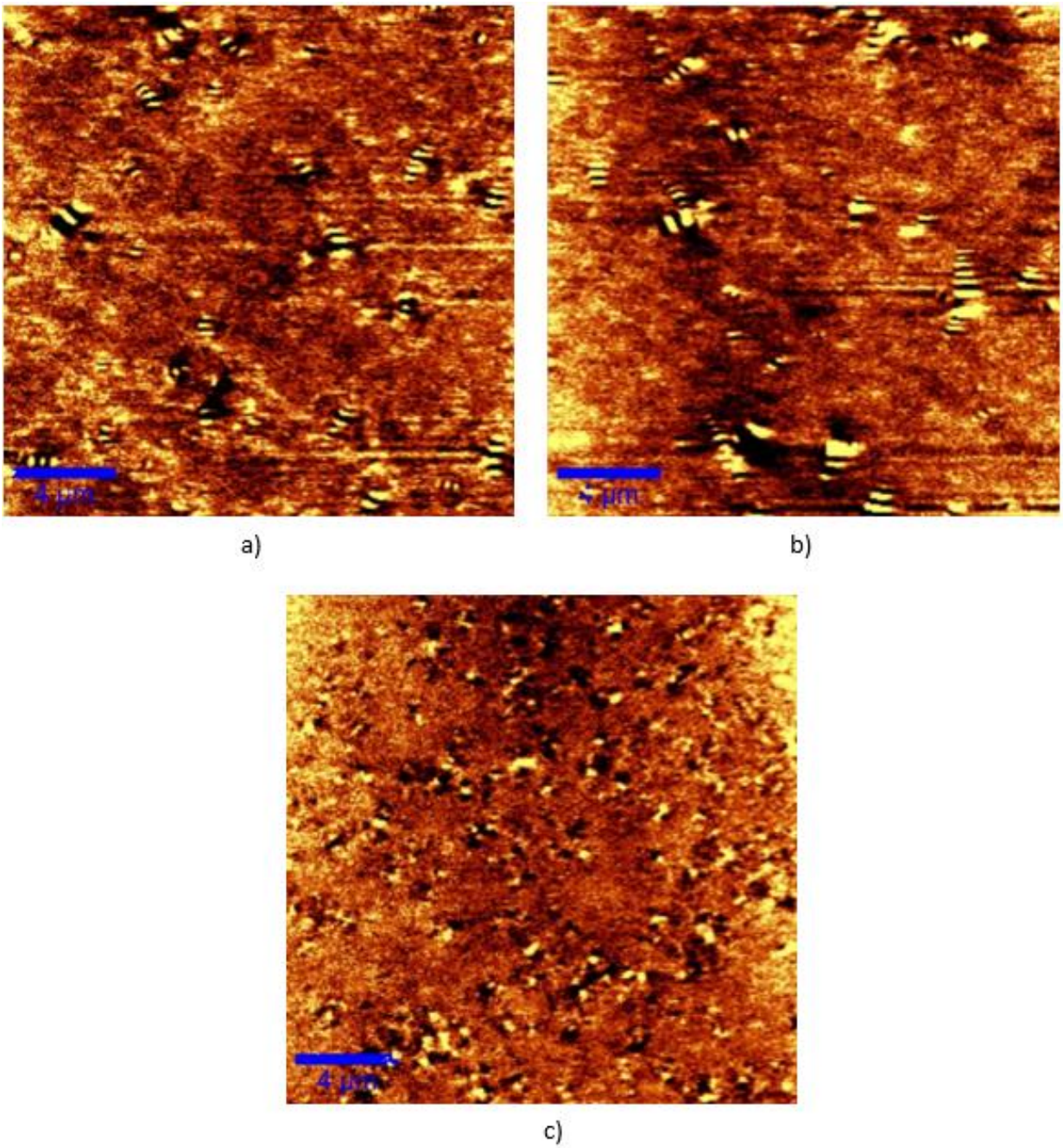
Microscopia de fuerza atómica (AFM) del PVC y billetes de PP

Las pruebas de AFM revalidan este punto ya que la topografía como se puede observar en la Figura 46, el asfalto original tiene una topografía prácticamente igual a la del asfalto modificado con pallets molidas de PVC ya que este no se incorporó al asfalto. Es importante mencionar que la escala del asfalto modificado es mayor, lo que quiere decir que este es más rugoso. La posible razón del porque no se ven las pallets molidas en el AFM del asfalto modificado es porque estas se segregaron en la mezcla.

En el caso del polipropileno se puede observar, un cambio en la topografía del asfalto modificado en comparación con el original. El asfalto modificado presenta una disminución del tamaño de la catanafase. Nuevamente la escala del asfalto modificado es mayor que la del original, por lo tanto, tienen una mayor rugosidad (Villacís, 2017, p. 50).

Figura 46

AFM del asfalto sin modificar, asfalto con PVC y PP



Topografías del asfalto sin modificar (a), modificado con PVC (b) y modificado con PP (C)

Nota. (Villacís, 2017, pp. 51-52).

Según Villacís (2017) al modificar un asfalto con polímeros se da una reducción de la per-fase y un aumento de la para-fase. Ambos cambios se pueden apreciar en el asfalto modificado con polipropileno y por lo tanto presenta una topografía similar a la esperada al modificar un asfalto con un polímero.

A pesar de la no incorporación del PVC al asfalto es posible considerar su uso como filler, (o material de relleno de tamaño pasa malla 200 o 75 mμ) ya que este si provocó que el asfalto se rigidizara. Con respecto al polipropileno, se puede ver que este si se incorporó de forma adecuada al asfalto (pp. 53-54).

Pruebas de desempeño materiales (PVC) y (PP)

Se procedió a realizar las pruebas de LAS, MSCR y el envejecimiento controlado RTFO + PAV.

Se evalúan los resultados de las pruebas de fatiga (LAS)

Según Villacís (2017) la resistencia a la fatiga de un pavimento puede evaluarse mediante tres parámetros clave que se muestran en la siguiente figura. A mayor valor del parámetro A y menor cercanía al cero del parámetro B, mayor será la resistencia del pavimento. El último dato presentado en la figura corresponde al número de ciclos en los que el pavimento falló.

Se observa que, al modificar el pavimento con PVC y polipropileno, el número de ciclos de carga necesarios para que ocurriera la falla fue menor, siendo la reducción más significativa con el uso de PVC, ya que los ciclos se redujeron a menos de la mitad en comparación con el asfalto sin modificar. En cuanto a los parámetros A y B, el asfalto modificado con polipropileno presenta valores similares al original, aunque el aumento en A viene acompañado de un alejamiento mayor de B respecto al cero. En el caso del asfalto modificado con PVC, también se incrementa el parámetro A, pero con una desviación aún mayor de B en comparación con el asfalto sin modificar (pp. 54-55).

Figura 47

Resultados y parámetros de la prueba de fatiga (LAS) MAC original y modificadas con PVC y PP

Asfalto	A	B	Nf
Original	3 595 896.7	-4.041	88655
Modificado con pallets de PVC molido	4 163 776.6	-5.099	38926
Modificado con polipropileno	3 793 469.8	-4.217	79574

Nota. (Villacís, 2017, p.54).

Resultados de las pruebas de MSCR

Los resultados de las pruebas de MSCR se pueden observar en la siguiente figura el parámetro Jnr es el que define el tipo de tráfico al que puede estar sometido el asfalto. Específicamente, la diferencia entre la respuesta elástica a 3,2 kPa es lo que garantiza que la estructura del asfalto sea resistente y estable al recibir una carga (Villacís, 2017, p.56).

Figura 48

Resultados MSCR modificadas con PVC y PP

Temperatura: 64 (Temperatura de Proyecto) °C		
Resultados reológicos	Asfalto modificado con PVC	Asfalto modificado con Polipropileno
R100 - Porcentaje de recuperación promedio a los 0.100kPa	52.4	28.4
R3200 - Porcentaje de recuperación a los 3.200kPa	44.8	9.6
R diff – Diferencia de porcentaje entre los 0.100kPa y los 3.200kPa	14.5	66.3
Jnr0.1 – Creep recovery a los 0.100kPa	0.084	0.48
Jnr0.32 – Creep recovery a los 3.200kPa	0.095	0.68
Jnr diff - Diferencia entre los 0.100kPa y los 3.200kPa	13.75	43.3

Nota: (Villacís, 2017, p.56).

Se puede observar que la recuperación elástica tiene un valor es de 0,095 para el asfalto modificado con PVC y 0,68 para el asfalto modificado con polipropileno. Estos valores de Jnr clasifican al asfalto como (E, max 0.5 kPa), apto para tráfico extremadamente pesado (mayor a 30 millones de ejes equivalentes) y (VH, max 1.0 kPa), muy pesado (de 10 a 30 millones de ejes equivalentes) respectivamente. La temperatura del proyecto se definió en 64 °C debido a que ese es el PG del asfalto original (Villacís, 2017, pp.56-57).

Análisis grado de desempeño (PG)

Por último, los resultados para el PG se pueden observar en la figura 49, que ambos modificantes produjeron una mejora en cuanto al desempeño del asfalto, el PVC aumentó el PG en 12 grados mientras que el Polipropileno lo aumentó en 18 grados en las temperaturas altas y 6 grados para ambos polímeros en la temperatura media.

Figura 49

Comparación del Grado de desempeño entre el asfalto original y los asfaltos modificados con PVC Y PP

	Asfalto		
Temperatura	**Original**	**Modificado con PVC**	**Modificado con Polipropileno**
Alta	64 °C	76 °C	82 °C
Media	25 °C	31 °C	31 °C
Baja	22 °C	22 °C	22 °C

Nota: (Villacís, 2017, p.58).

Según Villacís (2017) concluye que:

La dosificación utilizada de los polímeros es de 3%, en cuanto a su degradación térmica el PVC comienza a los 200 °C, lo cual asegura que no se degrade durante el proceso de mezclado asfáltico (que ocurre alrededor de 150 °C). Sin embargo, presenta una transición secundaria a los 75 °C, lo que podría afectar su comportamiento dentro de la mezcla si no se maneja adecuadamente. A pesar de que el PVC

molido no se incorporó correctamente en la matriz asfáltica —confirmado mediante análisis FTIR y AFM—, logró aumentar el grado PG del asfalto en 18 °C para la temperatura alta y 6 °C para la temperatura media. Este cambio permite que el pavimento pase de ser apto solo para bajo volumen de tránsito a soportar tráfico extremadamente pesado. No obstante, la resistencia a la fatiga se redujo en un 56 %, probablemente debido a la rigidez que el material sólido aporta al asfalto. Por esta razón, el PVC podría funcionar mejor como filler, aunque su uso puede aumentar la fragilidad del pavimento.

En cuanto al polipropileno, inicia su degradación a los 400 °C y presenta una transición secundaria a los 152 °C, lo cual es favorable, ya que no se ve afectado durante la incorporación a la mezcla. A diferencia del PVC, este material sí se integró correctamente, también comprobado con pruebas FTIR y AFM. Su adición elevó la temperatura alta del PG en 12 °C y la media en 6 °C, permitiendo que el pavimento pase de condiciones de tráfico estándar a muy pesado. Aunque se observó una leve disminución en la resistencia a la fatiga, fue solo de un 10 %, mucho menor en comparación con el PVC.

De lo indicado en los párrafos anteriores, se puede observar que el polipropileno presenta mejores resultados como modificante que el PVC (pp.59-60).

2.2.6 Asfalto y Pavimentos Flexibles Modificado con Resin8 ™ / Agregado de Resina Pre-condicionado (ARP)

En la búsqueda de soluciones sostenibles para la infraestructura vial, el aprovechamiento de residuos plásticos en mezclas asfálticas. Se destaca el desarrollo y uso del agregado de resina pre-condicionado (ARP), una mezcla compuesta principalmente por plástico reciclado trágico que se refiere a los plásticos no valorizables que terminan en el ambiente sin ningún tratamiento, como aditivo en mezclas asfálticas en caliente (MAC). A través de evaluaciones experimentales y análisis de desempeño estructural, se ha demostrado el potencial del ARP para mejorar la durabilidad del pavimento y aportar a la reducción del impacto ambiental del plástico desechado.

2.2.6.1 Evaluación del Desempeño de Mezclas Asfálticas Modificadas con Agregado de Resina Pre-condicionado (ARP) a Base de Plástico Reciclado.

En la investigación desarrollada por German Gómez, Luis Guillermo Loría, Donald Thompsom & David Zamora del año 2023 llamada "A*plicación de un agregado de resina pre-condicionado hecho de plástico reciclado como aditivo en mezcla asfáltica en caliente*" en conjunto con el centro para el desarrollo regenerativo y colaboración (CRDC) y la empresa privada PEDREGAL, se realiza un análisis y comparación de mezclas asfálticas originales y modificadas con agregado de resina pre-condicionado (ARP).

Según Gómez et al. (2023) En el año 2018, el CRDC, en colaboración con PEDREGAL, una empresa costarricense dedicada a la construcción y a la fabricación de materiales de obra, desarrolló un producto único y patentado llamado Agregado de Resina Pre-condicionado (ARP). Esta solución innovadora fue concebida como respuesta a la problemática del manejo de residuos plásticos. El ARP consiste en una mezcla obtenida por extrusión compuesta por aproximadamente un 80% de plásticos reciclados de diferentes fuentes y un 20% de componentes minerales, distribuidos principalmente en un 10% de cal y un 10% de ceniza (mayormente de madera, aunque también pueden emplearse otros tipos como ceniza de residuos agrícolas o plásticos).

El resultado de este proceso es un material con aspecto similar a la arena. La cal actúa como un agente antiséptico que ayuda a eliminar contaminantes presentes en el plástico. Durante el proceso, los componentes se mezclan a temperaturas entre 190 °C y 230 °C (dependiendo del tipo de plástico), y posteriormente se enfrían en agua, adquiriendo inicialmente una forma tubular rugosa, que luego se tritura para obtener una granulometría parecida a la arena. El equipo utilizado para la producción opera con un límite de temperatura de 240 °C, para evitar la liberación de gases tóxicos que algunos plásticos, como el PVC, podrían emitir a temperaturas superiores a 260 °C (p.3).

Figura 50

Aditivo de Resina Pre-condicionada (ARP) producido a base de plástico de desecho



Nota. (Gómez et al; 2023, p.3).

Según Gómez et al. (2023) se han llevado a cabo extensos ensayos para evaluar el uso del ARP patentado como modificador en MAC. Este artículo presenta los resultados correspondientes a la Fase IV del estudio, la cual incluyó la construcción de cuatro tramos de prueba a escala real sobre un segmento de la Ruta 27 en Costa Rica, una vía actualmente en concesión. Durante esta etapa, se realizaron pruebas de desempeño, control de calidad convencional, y se analizó la facilidad de replicar el diseño de mezcla,

además de evaluar aspectos operativos como el acarreo, la colocación y la compactación de la mezcla asfáltica.

Los tramos fueron construidos con diferentes proporciones de ARP como sustituto del agregado fino: el tramo de control no contenía ARP, mientras que los tramos A, B y C incluyeron respectivamente 1,0 %, 2,0 % y 3,0 % de este material. En todos los casos, la inclusión del ARP se realizó por sustitución directa del agregado fino, en los porcentajes indicados.

A pesar de que el ARP se presenta físicamente como una arena, su comportamiento durante el mezclado es el de un aditivo polimérico, ya que está compuesto principalmente por resina plástica reciclada. Esta propiedad se confirma a través de un análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC), el cual muestra que el ARP tiene un punto de fusión de 125,3 °C. Dado que la temperatura de mezcla utilizada en el proceso fue de 155 °C, el ARP se funde completamente, integrándose con el asfalto (pp.4-5).

Según indica Gómez et al. (2023):

> En las siguientes figuras se observan los resultados de control de calidad tradicionales (Marshall y volumetría) de los tramos de prueba colocados en la Ruta 27. En todos los casos hay cumplimiento del diseño original y de las especificaciones costarricenses. Esto implica que el diseño de mezcla de laboratorio se puede reproducir a escala industrial en planta y cumplir con la especificación. Las variaciones en la estructura granulométrica se deben al proceso de producción y no a la incorporación del ARP, además de que se presentan los tamices de agregado grueso.
>
> Se presentan, los resultados de resistencia retenida al daño inducido por humedad (AASHTO T283). En este caso también hay cumplimiento del valor mínimo de especificación que es de 80,0%, aunque la mezcla control obtuvo un valor superior (86%) que las mezclas con APR que apenas pasan dicho valor mínimo especificado (p.5).

Figura 51

Diseño y resultados de control de calidad en MAC con ARP

Diseño de mezcla		Especificaciones			Resultados de ensayo (Dic, 2021)			
Granulometría (AASHTO T 30)*		Lím. Inf.	Diseño	Lím. Sup.	Control	1% ARP	2% ARP	3% ARP
25.4 mm	-	100	**100**	100	100	100	100	100
19 mm	-	94	**98**	100	100	99	99	99
12.7 mm	-	75	**82**	85	85	83	82	83
9.5 mm	-	62	**68**	72	72	69	65	72
No. 4	-	37	**45**	45	43	41	39	42
No. 8	-	22	**28**	30	27	27	26	26
No. 16	-	14	**19**	22	18	18	17	17
No. 30	-	9	**14**	17	13	13	13	12
No. 50	-	5	**10**	12	10	10	9	10
No. 100	-	4	**7**	8	8	7	7	7
No. 200	-	3.0	**4.8**	7.0	6.1	5.8	5.8	5.6
Contenido de asfalto (AASHTO T 164)								
PTA (%)	-	5.60	**6.16**	6.72	6.06	5.97	6.27	6.62
PTM (%)	-	5.30	**5.80**	6.30	5.71	5.63	5.90	6.21
Parámetros Marshall (HMA)								
Estabilidad (ASTM D 6927)*, kg	> 800	-	**1207**	-	1508	1611	1592	1773
Flujo (ASTM D 6927)*, cm/100	20 - 35	33.0	**35**	37.0	30.5	32.7	30.6	30.0
Gravedad específica máxima teórica, Gmm (AASHTO T 209)	-	2.464	**2.444**	2.423	2.443	2.435	2.444	2.440
Gravedad específica bruta, Gmb (AASHTO T 166)*	-	2.336	**2.345**	2.357	2.326	2.315	2.334	2.320
Vacíos (AASHTO T 269)	3,0 - 5,0	-	**4,0**	-	4.8	4.9	4.5	4.9
Propiedades Volumétricas (MAC)								
V.M.A. (%)	>14	15.8	**15.9**	16.0	16.5	16.8	16.4	17.6
V.F.A. (%)	65-78	67.3	**75**	83	68.6	65.6	72.5	69.3
Relación Polvo/asfalto efectivo (DP), %	0,6 - 1,3	1.03	**0.92**	0.84	1.21	1.17	1.09	1.02

Nota. (Gómez et al; 2023, p.3).

Figura 52

Resultados de resistencia retenida al daño por humedad mediante el ensayo de tracción indirecta de mezclas de control y modificadas con ARP

Daño por humedad (AASHTO T 283)		Especificaciones			Resultados de ensayo (Dic, 2021)			
		Lím. Inf.	Diseño	Lím. Sup.	Control	1% ARP	2% ARP	3% ARP
Contenido de vacíos, especímenes secos (AASHTO T 269)	-	6.0	**7.0**	8.0	6.8	6.9	7.3	6.9
Contenido de vacíos, especímenes acondicionados (AAS	-	6.0	**7.0**	8.0	7.0	7.0	7.3	6.9
Esfuerzo de tracción indirecta, seco, kPa	-	-	**1590**	-	1340.0	1638.0	1539.0	1471.0
Esfuerzo de tracción indirecta, húmedo, kPa	-	-	**1306**	-	1146.0	1328.0	1232.0	1213.0
Resistencia retenida a la tracción indirecta	> 80	-	**82**	-	86	81	80	82

Nota. (Gómez et al; 2023, p.3).

2.2.6.2 Resultados de Ensayos de Desempeño MAC Modificadas con ARP

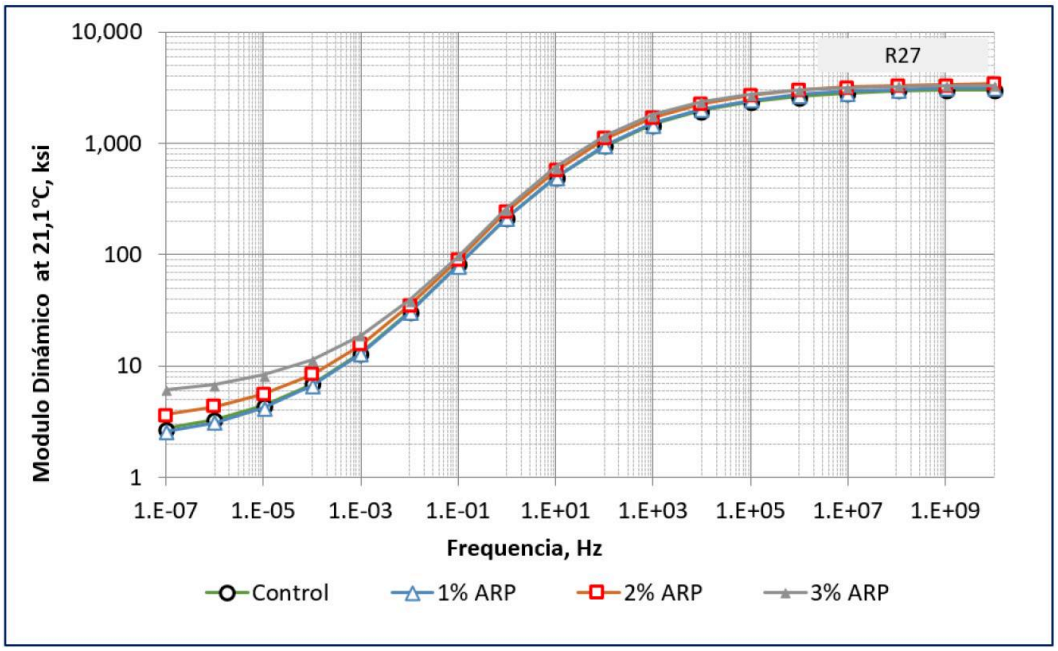
El módulo dinámico (E*) de las mezclas asfálticas fue evaluado mediante ensayos de compresión siguiendo el estándar AASHTO T 342, mostrando resultados prometedores. Se observó que el uso del ARP patentado tiende a aumentar la rigidez de la mezcla, de manera similar a los ligantes modificados con polímeros.

La mezcla con 1,0 % de ARP mostró una rigidez muy similar al tratamiento control, mientras que con 2 % y 3 % de ARP se evidenció un incremento más notable, entre 15,0 % y 23,3 %, a 21,1 °C y 10 Hz. Las curvas maestras de E* confirmaron que no se produjeron cambios estructurales ni morfológicos en el ligante, lo que indica que el ARP simplemente endurece el asfalto sin modificar su naturaleza viscoelástica.

Esto es consistente con el comportamiento del material durante la mezcla, ya que el ARP, compuesto de resina plástica reciclada, se funde completamente e integra con el asfalto en el proceso de producción de la MAC (Gómez et al; 2023, p.8).

Figura 53

Curvas maestras de módulo dinámico MAC control y ARP al 1% 2% y 3%



Nota. (Gómez et al; 2023, p.8)

Figura 54

Módulo dinámico MAC control y ARP al 1% 2% y 3%

Módulo dinámico (E*) @ 21,1°C y 10 Hz

Tratamiento	E* @ 21,1°C;10Hz, psi	Incremento (%)
Control	501000	-
1% ARP	503100	0,4
2% ARP	576200	15,0
3% ARP	617700	23,3

Nota. (Gómez et al; 2023, p.8).

Propiedades a Deformación Permanente y Daño por Humedad, se evaluaron mediante la prueba de la Rueda de Hamburgo (HWT), siguiendo el procedimiento establecido por la norma AASHTO T 324. Los resultados obtenidos fueron igualmente alentadores.

Todos los tratamientos experimentales, incluidos aquellos modificados con el ARP patentado, demostraron una excelente resistencia a la humedad, ya que no se observó ningún signo de desintegración o despegue del agregado antes de alcanzar las 20 000 pasadas de carga. Además, se evidenció una reducción en la deformación permanente en todas las mezclas que contenían ARP, con una disminución de hasta un 9,0 % en el caso de la mezcla con un 3,0 % de adición (Gómez et al; 2023, p.9).

Figura 55

Resumen de resultados del ensayo de deformación permanente determinada en la Rueda de Hamburgo para MAC modificadas con ARP

Tratamiento	Deformación permanente, mm	Variación (%)
Control	5,06	-
1% ARP	5,11	1,0
2% ARP	4,69	7,3
3% ARP	4,60	9,0

Nota. (Gómez et al; 2023, p.9).

Resultados de Fatiga en la Viga de 4-Puntos (4PBB), se realizaron ensayos conforme al protocolo AASHTO T 312. Los resultados obtenidos cumplieron con las especificaciones establecidas en Costa Rica para mezclas resistentes a la fatiga, correspondientes a los niveles de deformación unitaria de 400µS y 600µS, que exigen 450 000 y 50 000 repeticiones de carga, respectivamente.

Sin embargo, se observó una reducción en la vida útil a fatiga en todos los tratamientos modificados con ARP patentado, en ambos niveles de deformación. Este comportamiento era previsible, dado que el ARP incrementa la rigidez del ligante, lo cual suele asociarse a una menor flexibilidad en la mezcla (Gómez et al; 2023, p.9).

Figura 56

Fatiga en viga de 4 puntos a 400µS y 600µS, 20°C MAC de control y modificadas con ARP

Tratamiento	400 µS	Variación (%)	600 µS	Variación (%)
Control	711885	-	95655	-
1% ARP	573290	19,5	55610	41,9
2% ARP	551530	22,5	54743	42,8
3% ARP	516383	27,5	54090	43,5
Especificación	Mín 450000	-	Mín 50000	-

Nota. (Gómez et al; 2023, p.9).

Se llevó a cabo un análisis mecanístico-empírico (ME) del desempeño estructural de un pavimento hipotético utilizando las mezclas asfálticas evaluadas, modelando una estructura típica de Costa Rica según la metodología AASHTO 93. La evaluación incluyó tanto el comportamiento a fatiga como la deformación permanente, empleando como parámetro de rigidez el módulo dinámico (E) medido a 21,1 °C y 10 Hz*. La modelación se realizó mediante el software de código abierto Pitra-Pave, basado en teoría de multicapa elástica.

El diseño original contemplaba una carga de 20 millones de ESAL's y un número estructural (SN) de 4,91. Según los resultados, tanto la mezcla de control como las modificadas con 1 %, 2 % y 3 % de ARP cumplieron satisfactoriamente con estos requerimientos. Si bien la diferencia en desempeño estructural

fue mínima para las dos primeras dosis de ARP, la mezcla con 3 % mostró un impacto significativo, ya que su módulo dinámico fue 23,3 % mayor que el control y aproximadamente 8 % superior al tratamiento con 2 %.

Respecto a la vida a fatiga, el diseño requería soportar 20,8 millones de ESAL's. La inclusión del ARP no solo no redujo este valor, sino que lo aumentó hasta 23,4 millones, como resultado de la combinación de una mayor rigidez y una menor deformación unitaria en la base de la capa MAC, lo cual beneficia el comportamiento a fatiga pese al incremento de rigidez.

En cuanto a la deformación permanente, se observó una mejora similar. Al aumentar el módulo de rigidez con el ARP, las deformaciones unitarias en la subrasante y la capa asfáltica disminuyeron, elevando así la resistencia frente a este tipo de deterioro (Gómez et al; 2023, pp.10-11-12).

Figura 57

Diseño mecanístico-empírico, fatiga y Deformación de MAC control y modificada con ARP

		Control	1% ARP	2% ARP	3% ARP
			Número Estructural (SN)		
	SN Calculado	5,33	5,35	5,33	5,52
	SN Requerido	4,91	4,91	4,91	4,91
			Espesor de capa (cm)		
HMA	cm	10,00	10,00	10,00	10,00
BG	cm	25,00	25,00	25,00	25,00
SB	cm	30,00	30,00	30,00	30,00
			Módulo Dinámico a 21,1°C y 10 Hz		
HMA	psi	501 000	503 100	576 200	617 700
BG	psi	28 000	28 000	28 000	28 000
SB	psi	15 000	15 000	15 000	15 000
			ESALs		
SN Calculado	W18	37 019 744	38 066 784	42 245 889	48 116 947
SN Requerido	W18	20 000 000	20 000 000	20 000 000	20 000 000
			DAÑO ACUMULADO		
	Vida de Fatiga	2,08E+07	2,11E+07	2,23E+07	2,34E+07
	Def. Perm. MAC	1,83E+33	1,92E+33	2,12E+33	2,69E+33
	Def. Perm. SR	4,22E+06	4,28E+06	4,41E+06	4,69E+06

Nota. (Gómez et al; 2023, p.12).

Según Gómez et al. (2023) Concluye que:

El Agregado de Resina Pre-condicionado (ARP), constituye una alternativa viable para incorporar plástico reciclado en MAC, el mismo fue incorporado exitosamente en la producción, cumpliendo con los requisitos tradicionales tanto a escala de laboratorio como en procesos industriales de producción, transporte, colocación y compactación. Aunque su apariencia es similar a una arena fina y se usó como sustituto de agregado fino, el ARP actúa como un aditivo polimérico, fundiéndose completamente con el asfalto a temperaturas de mezcla (125,3 °C), lo que explica el incremento en el módulo dinámico observado.

Los ensayos indicaron que la incorporación de ARP mejora la resistencia a la deformación permanente y que la resistencia al daño por humedad evaluada mediante la Rueda de Hamburgo fue satisfactoria en todos los casos. Sin embargo, en el ensayo de resistencia retenida a la tracción indirecta, aunque las mezclas con ARP cumplieron con los mínimos especificados, mostraron una ligera disminución respecto al tratamiento control.

En términos de resistencia a fatiga, las mezclas modificadas con ARP cumplieron con la normativa costarricense para los niveles de deformación evaluados (400 µS y 600 µS), aunque se observó una tendencia a la reducción de la vida útil a fatiga al aumentar el contenido de ARP, lo cual es coherente con el aumento de rigidez de la mezcla. Finalmente, el análisis mecanístico-empírico aplicado a un diseño hipotético de pavimento mostró que las mezclas con ARP presentan un mejor desempeño estructural frente a la fatiga y la deformación permanente, validando su aplicación técnica en infraestructura vial. (pp.13-14)

2.2.7 Asfalto y Pavimentos Flexibles Modificado con Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) y con poliestireno (PS)

2.2.7.1 Evaluación del Desempeño de Mezclas Asfálticas Modificadas con Residuos Informáticos de ABS y PS.

En el año 2019 Daniel Mauricio Casas & Diana Milena Metaute consideró en su tesis de investigación llamada "*Desarrollo de una mezcla asfáltica utilizando residuos plásticos*" el comportamiento

mecánico de mezclas asfálticas modificadas mediante la incorporación de polímeros provenientes de residuos informáticos, específicamente carcasas de pantallas, principalmente compuestas por Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) y diskettes mayoritariamente elaborados con poliestireno (PS), empleados como agregados sólidos particulados. El estudio examinó el efecto de variables como el tamaño de partícula del polímero (fino y grueso, respecto a la malla 8), el porcentaje de polímero (6 %, 13 % y 20 %) y el contenido de material asfáltico (4.3 %, 4.9 % y 5.5 %) dentro de la mezcla total. Se desarrollaron trece formulaciones distintas, evaluadas a través de sus resultados de estabilidad y flujo, los cuales sirvieron como criterios fundamentales para identificar las mezclas con mejor desempeño (pp.1-2).

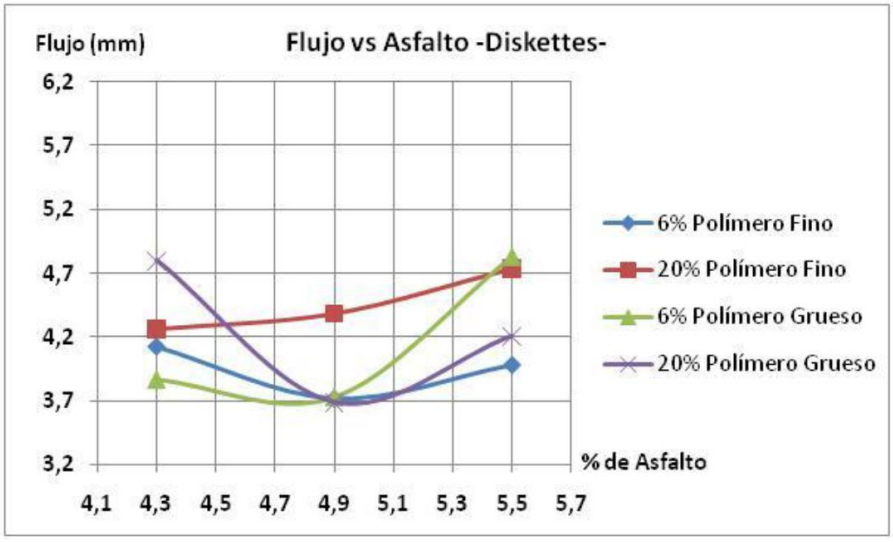
La caracterización del PS en diskettes se realizó mediante espectroscopía infrarroja, confirmando su predominancia tanto en presentaciones traslúcidas como opacas. Adicionalmente, el análisis térmico de los materiales plásticos fue efectuado mediante Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC). Los resultados mostraron que las carcasas no presentan un punto de fusión claro, sino que se degradan térmicamente entre 250 °C y 309 °C, sin evidencia de recristalización. El material de diskettes mostró un pico a 370 °C, pero no fue concluyente como punto de fusión. Esto indica que los plásticos estudiados poseen una estructura amorfa, permitiendo sólo determinar su temperatura de transición vítrea (Casas & Metaute, 2009, p.26).

Análisis de Flujo Bajo el Método Marshall para MAC Modificada con PS y ABS.

En el caso de los diskettes, se observa que el menor valor de flujo se presenta, en la mayoría de los casos, con un contenido de asfalto cercano al 4.9 %. En contraste, las carcasas muestran un comportamiento diferente; no obstante, al considerar únicamente la mezcla con 6 % de polímero fino tras descartar el uso de polímero grueso y concentraciones superiores al 6 %, también se obtuvo el flujo más bajo con un 4.9 % de asfalto. Por ello, este porcentaje fue seleccionado como el más adecuado para las mezclas óptimas (Casas & Metaute, 2009, p.33).

Figura 58

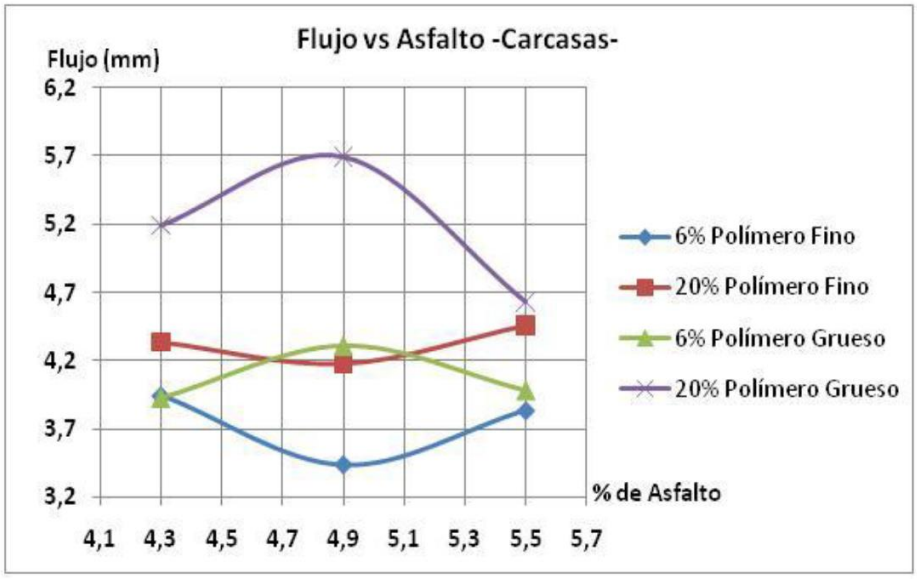
Flujo vs MAC modificada con Diskettes



Nota: (Casas & Metaute, 2009, p.33).

Figura 59

Flujo vs MAC modificada con Carcasas



Nota: (Casas & Metaute, 2009, p.33).

Según Casas & Metaute (2009) las formulaciones óptimas se seleccionaron considerando que el flujo estuviera dentro del rango normativo (2 mm – 3.5 mm). Se aplicó un modelo de regresión multivariable para analizar el efecto de los componentes de la mezcla sobre el flujo. El análisis mostró que, en mezclas con carcasas, el tamaño de partícula es el factor más influyente, mientras que en las de diskettes tiene menor relevancia, debido a las diferencias en propiedades mecánicas, térmicas y químicas de los plásticos. Con base en los resultados estadísticos, análisis Marshall y criterios económicos, se definió una mezcla óptima con 5 % de plástico fino y 4.9 % de asfalto. El modelo predijo flujos de 3.53 mm para carcasas y 3.7 mm para diskettes, cercanos a los valores reales de 3.2 mm y 3.4 mm, respectivamente.

En cuanto a la estabilidad, que según norma debe ser mayor a 900 kg, todas las mezclas superaron este valor. La mezcla patrón presentó 1273 kg, mientras que las formulaciones óptimas alcanzaron 1452 kg (carcasas) y 1529 kg (diskettes). Además, cumplieron con la relación estabilidad-flujo exigida (entre 300 y 600 kg/mm), registrando valores cercanos a 450 kg/mm (pp.35-36).

Figura 60

Resultado de estabilidad y flujo para las formulaciones con 5% de polímero.

	Réplica	Tamaño de partícula	% de Polímero	% de Asfalto	Flujo (mm)	Estabilidad (kg)	Relación estabilidad/flujo (kg/mm)
Diskettes	1	fino	5	4,9	3,38	1580	467
	2	fino	5	4,9	3,32	1478	445
	3	fino	5	4,9	3,46	1529	442
Carcasas	1	fino	5	4,9	3,70	1880	508
	2	fino	5	4,9	3,30	1539	466
	3	fino	5	4,9	3,10	1366	440

Nota: (Casas & Metaute, 2009, p.36).

Análisis de Porcentaje de Vacíos.

Para determinar el porcentaje de vacíos en las formulaciones seleccionadas, se calcularon la gravedad específica bulk y la gravedad específica máxima teórica. Según los criterios establecidos, se

consideran mezclas compactas aquellas que no superan un 10 % de vacíos, y las mezclas modificadas cumplen con este requisito. El incremento en el porcentaje de vacíos podría deberse a la reducción de la densidad total de la mezcla al incorporar polímeros, ya que al sustituirse un 5 % de agregados pétreos, también se reduce la cantidad de estos debido al aumento del volumen total de la mezcla. Esto genera un excedente de material durante la elaboración de las probetas, lo que implica que se requiere menos mezcla por unidad de volumen. Como resultado, se reduce la presencia de llenante pétreo grueso, lo que a su vez incrementa los vacíos en la mezcla (Casas & Metaute, 2009, p.37).

Figura 61

Porcentaje de Vacíos de las Muestras

Muestra	Gravedad específica bulk	Gravedad específica máxima teórica	%Vacíos
Patrón	2,500	2,620	4,58
Diskettes	2,260	2,446	7,60
Carcasas	2,280	2,461	7,35

Nota: (Casas & Metaute, 2009, p.37).

Ensayo de Fatiga para MAC de Patrón y Modificadas con ABS y PS.

Se ensayaron probetas bajo tres niveles de carga (100, 200 y 400 kPa) aplicando tracción indirecta a una frecuencia de 10 Hz, sin tiempos de recuperación entre cargas. Las condiciones ambientales fueron una temperatura promedio de 23.5 °C y una humedad del 67 %. A 100 kPa, la mezcla patrón mostró el mejor comportamiento, resistiendo el mayor número de ciclos antes de agrietarse. Sin embargo, al aumentar la carga, la mezcla con carcasas alcanzó un desempeño similar y, finalmente, a 400 kPa, superó a la mezcla patrón. En todos los casos, la mezcla con diskettes tuvo un comportamiento inferior. Aunque los ensayos de fatiga no definen por sí solos la aceptación o rechazo de las mezclas, sí permiten una evaluación comparativa inicial y deben ser considerados según las condiciones de tránsito del lugar donde se aplicará el material (Casas & Metaute, 2009, pp. 39-40).

Figura 62

Ciclos de fractura ensayo de Fatiga

	CICLOS		
	100 kPa	200 kPa	400 kPa
PATRÓN	10400	1000	459
CARCASAS	6550	950	621
DISKETTES	6170	660	356

Nota. (Casas & Metaute, 2009, p.40).

Figura 63

Deformaciones ensayo de Fatiga

ESFUERZO MÁXIMO	DEFORMACIÓN (mm)		
	Patrón	Carcasas	Diskettes
100 kPa	0,08	0,07	0,09
200 kPa	0,15	0,16	0.17
400 kPa	0,22	0,24	0,27

Nota: (Casas & Metaute, 2009, p.40).

Módulo dinámico (E_d)

Según Casas & Metaute (2009) la prueba se realizó con probetas de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura, aplicando una carga de aproximadamente 1000 N durante 30 segundos, con una frecuencia de 4 Hz, asegurando un esfuerzo inferior a 241 kPa, como exige la norma. Las condiciones ambientales fueron 23 °C y 65 % de humedad. Los resultados mostraron que las mezclas modificadas (con carcasas y diskettes) presentaron menor deformación que la mezcla patrón, lo que sugiere una mayor resistencia al ahuellamiento. El módulo dinámico, que mide la rigidez del material frente a cargas cíclicas, fue mayor en la mezcla con diskettes, lo cual coincide con su menor resistencia a la fatiga observada en pruebas previas (se agrieta con menos ciclos), debido a su mayor rigidez (p.45)

Figura 64

Módulos Dinámicos (Ed), desviación estándar (S) y Coeficientes de Variación (Cv) de la prueba

	$\overline{E_d}$ (kg/cm²)	S	C_v
Patrón	6704.1	7	1,2
Carcasas	5714.3	8	1,6
Diskettes	7163.3	20	2,8

Nota. (Casas & Metaute, 2009, p.48).

Análisis de Ensayo de Creep.

Se realizaron dos pruebas de Creep con diferentes tipos y tamaños de probetas: una con probetas grandes (100 x 200 mm, carga de 700 N) y otra con probetas pequeñas (102 x 63.5 mm, carga de 4000 N), aplicando carga y relajación por una hora cada una. En ambos casos, las mezclas modificadas (con polímeros) mostraron mayor capacidad de recuperación, aunque también mayor deformación que la mezcla patrón. En la primera prueba, la deformación de las mezclas modificadas fue más del doble que la de la mezcla patrón. En la segunda, la mezcla con ABS (carcasas) mostró la menor deformación, superando a la mezcla con poliestireno (diskettes), que fue la que más deformó.

En conjunto, los resultados de las pruebas dinámicas indican que la mezcla con carcasas de ABS presenta el mejor comportamiento general: mayor resistencia a la fatiga, buen módulo dinámico y mejor recuperación en Creep bajo cargas elevadas (Casas & Metaute, 2009, pp. 49-50-51).

Figura 65

Resultados de deformación Creep, 700 N.

DEFORMACIÓN (mm)	PATRÓN	CARCASAS	DISKETTES
TOTAL	0,53	1,53	1,29
PERMANENTE	0,45	1,41	1,2
RECUPERADA	0,08	0,12	0,09

Nota: (Casas & Metaute, 2009, p.50)

Figura 66

Resultados de deformación Creep, 4000 N

DEFORMACIÓN (mm)	PATRÓN	CARCASAS	DISKETTES
TOTAL	2,1	1,6	2,4
PERMANENTE	1,82	1,21	2,05
RECUPERADA	0,28	0,39	0,35

Nota: (Casas & Metaute, 2009, p.51)

Según Casas & Metaute (2009) concluye que:

Con base en los puntos de fusión de los polímeros y la viabilidad del proceso, se concluye que la mejor forma de incorporar residuos plásticos en mezclas asfálticas es como agregados, no como ligantes. Las formulaciones que cumplieron con los criterios de la norma INVIAS en estabilidad y flujo fueron aquellas que utilizaron menos del 6 % de polímero fino y un contenido de asfalto entre 4.7 % y 4.9 %, conforme a los resultados del diseño Marshall. Aunque el porcentaje de vacíos fue superior al reglamentario, los ensayos dinámicos sugieren mejoras potenciales en el desempeño frente a las mezclas convencionales, lo que justifica continuar con la investigación.

Los resultados también evidencian que el tamaño de partícula fino ofrece un mejor comportamiento en cuanto al flujo, en concordancia con los rangos establecidos por la norma, y por ello fue seleccionado para los análisis posteriores. En cuanto a la estabilidad, si bien no se identificó una tendencia clara asociada a los factores del diseño experimental, se observó que las mezclas con material de diskettes presentaron valores de estabilidad superiores a las muestras patrón en la mayoría de los casos. Se recomienda realizar estudios adicionales que evalúen todos los requisitos técnicos de los materiales y mezclas, ya que el enfoque inicial se limitó a estabilidad y flujo, debido a restricciones de tiempo, costos y operatividad en laboratorio (p.60).

2.2.8 Impacto Ambiental de Mezclas Asfálticas Modificadas con Plásticos Reciclados

A lo largo de la presente investigación, se ha evidenciado que el uso de plásticos reciclados como modificantes en mezclas asfálticas representa una alternativa viable para mitigar el impacto ambiental asociado tanto a la contaminación por residuos plásticos como al uso intensivo de materiales vírgenes en la infraestructura vial. Los estudios recopilados demuestran que, al incorporar estos residuos en el asfalto, se reduce significativamente la cantidad de desechos destinados a vertederos o al ambiente, al tiempo que se prolonga la vida útil del pavimento debido a las mejoras en su comportamiento mecánico.

Asimismo, se identificaron beneficios ambientales indirectos, como la disminución del consumo energético y de emisiones de gases de efecto invernadero durante el ciclo de vida del pavimento, especialmente cuando se aplican criterios de economía circular desde el diseño del proceso.

En el año 2021 Rafael Ernesto Villegas Villegas consideró en su trabajo final de investigación llamado “Diseño de la producción de mezclas asfálticas modificadas con residuos plásticos mediante la metodología IDOV DE SEIS SIGMA, incorporando los lineamientos de economía circular.” la utilización de plásticos en proyectos carreteros como modificante de las mezclas asfálticas tradicionales generando un valor ambiental positivo, pues permite una reducción de desechos sólidos por el alto volumen de materia prima necesarios para los proyectos. Por ejemplo, una vagoneta de 18 toneladas de mezcla asfáltica es capaz de pavimentar 17 metros lineales de carretera, en esa longitud, por lo que la incorporación de plásticos en una mezcla de 1% representaría la incorporación de aproximadamente 6,5x103 botellas plásticas de 600 mililitros.

Por tanto, este proyecto ofrece una solución eficaz para el tratamiento, la reutilización y la incorporación del plástico de desecho en una actividad económica, como lo es la producción de mezclas asfálticas para la construcción de carreteras, enmarcándolo dentro de los lineamientos de economía circular (pp.7-8).

Figura 67

Resumen del diseño a utilizar para producir mezclas asfálticas modificadas con residuos plásticos



Nota: (Villegas, 2021 p.94).

2.2.8.1 Análisis Comparativo de Emisiones de CO_2 en Mezclas Asfálticas con PET Virgen y Reciclado. Según Carla Aguilar, Valerio Andrés, Manuel Lagos, Diana Movilla, Osvaldo Muñoz, Aitor Raposeiras (2021), en artículo titulado: Análisis de emisiones de gases de efecto invernadero y del impacto ambiental de la producción de mezclas asfálticas modificadas con materiales reciclados, la producción de un kilogramo de PET libera aproximadamente 1,7 kg de CO_2 a la atmósfera. Además, se indica que el incremento de temperatura durante la etapa de mezclado puede provocar la degradación del material, lo que incrementa aún más las emisiones de CO_2 en comparación con otras mezclas (p.8).

Por su parte, PlasticsEurope (2005) señala que la generación de PET virgen puede emitir entre 2.9 kg de CO_2 equivalente por kg, dependiendo del proceso industrial, mientras que el uso de PET reciclado permite una disminución significativa de la huella de carbono (p.10).

2.2.9 Estimación Comparativa de Costos de Producción entre Mezclas Asfálticas Convencionales y Modificadas con Plástico.

La incorporación de plástico reciclado en mezclas asfálticas representa una alternativa sostenible frente a las mezclas convencionales. Esta estimación de costos compara ambos tipos de mezcla utilizando costos promedio de materiales y procesos en Costa Rica, con el fin de evaluar su viabilidad económica y sus posibles beneficios a largo plazo.

Para la estimación de costos para la factibilidad económica, se pretende cuantificar el costo de producción de la mezcla asfáltica convencional y la mezcla asfáltica modificada con plástico de desecho desde el punto de vista del costo de materia prima, esto con el fin de realizar una comparación por precio de los productos y estimar si este factor es una ventaja competitiva o un factor limitante del estudio (Villegas; 2021, p.138).

Figura 68

Análisis de costos de producción por materiales de mezcla asfáltica convencional.

Cantidad de mezcla producida en bache (t)	18
Costo de Producción por tonelada	₡48.337,61
Costo de Producción del bache	₡870.077,02
Precio de venta por tonelada	₡70.962,00
Precio de venta del bache	₡1.277.316,00
Margen de ganancia por tonelada	₡22.624,39
Margen de ganancia por bache	₡407.238,98

Nota: (Villegas, 2021 p.139).

Según Villegas (2021) La modificación de la mezcla asfáltica con residuos plásticos plantea la incorporación de un material adicional al proceso y, por ende, los costos de producción por materiales incrementan (p. 139).

Figura 69

Análisis de costos de producción por materiales de mezcla asfáltica con residuos plásticos.

Cantidad de mezcla producida en bache (t)	18,18
Costo de Producción por tonelada	₡51.819,42
Costo de Producción del bache	₡942.077,02
Precio de venta por tonelada	₡70.962,00
Precio de venta del bache	₡1.290.089,16
Margen de ganancia por tonelada	₡19.142,58
Margen de ganancia por bache	₡348.012,14

Nota: (Villegas, 2021 p.140).

Como parte de la estimación comparativa del uso de materiales reciclados en mezclas asfálticas, se compararon los costos de producción para una cantidad equivalente de 18 toneladas, tanto para una mezcla asfáltica convencional como para una mezcla modificada con plástico reciclado.

Desde el punto de vista porcentual, la mezcla modificada con plástico presenta un incremento del 8.28% respecto al costo de la mezcla convencional, este aumento puede atribuirse a factores como la preparación previa del plástico reciclado y procesos adicionales de modificación en planta. Sin embargo, es importante considerar que este incremento podría verse compensado a mediano o largo plazo si se logran mejoras en la durabilidad y desempeño de las mezclas modificadas, además de su impacto positivo en la sostenibilidad ambiental.

Adicionalmente, durante el webinar titulado “ Asfaltos con RESING8: Caminos hacia la sostenibilidad”, organizado por la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC) de la Ciudad de México el 22 de mayo de 2025, se abordó el tema del uso de asfaltos modificados con Resing8 (Agregado de Resina Pre-condicionado). En dicho evento, se le consultó al ingeniero Germán Gómez, gerente de producción de

la empresa Pedregal responsable del desarrollo de Resing8 sobre la diferencia en los costos de producción entre una mezcla asfáltica convencional y una mezcla modificada con este aditivo.

El ingeniero Gómez explicó que no se dispone de un dato exacto, ya que cada mezcla es formulada de manera específica según los requerimientos de cada proyecto. No obstante, señaló que, en promedio, la mezcla asfáltica modificada con Resing8 puede implicar un incremento aproximado del 5% en los costos de producción respecto a la mezcla convencional (Gómez, Loria & Ossa, 2025).

2.3 Marco Legal

2.3.1 Ley N.º 9828

Denominada uso de materiales reutilizables en pavimentos y obras de infraestructura vial, representa un avance significativo en la legislación costarricense hacia la sostenibilidad en el sector de infraestructura. Publicada en junio de 2020, esta ley establece un marco normativo que impulsa el uso progresivo de materiales reciclados en la construcción, conservación y mantenimiento de la red vial del país. A través de lineamientos técnicos definidos por el LanammeUCR y metas escalonadas de incorporación de materiales reciclados en mezclas asfálticas, la ley busca reducir el impacto ambiental de la extracción de recursos vírgenes, promover la economía circular y contribuir a los compromisos nacionales en materia de carbono neutralidad y desarrollo sostenible.

Misma ley establece según su artículo 1, al menos el cincuenta por ciento (50%) del volumen total de los materiales utilizados en obras de construcción, reconstrucción, conservación, mantenimiento y rehabilitación de vías nacionales y cantonales deberá contener algún porcentaje de materiales reutilizables (Ley N.º 9828, 2020).

2.3.2 Ley N.º 9786

En el marco de los esfuerzos por avanzar hacia un modelo de desarrollo sostenible, denominada Ley para combatir la contaminación por plástico y proteger el ambiente, constituye una herramienta clave para promover la economía circular y la gestión responsable de los recursos. Esta normativa declara de

interés público todos los planes, programas y proyectos que impulsen la prevención, reducción, reutilización, valorización y reciclaje de plásticos de un solo uso, así como las iniciativas de educación, investigación y reconversión productiva orientadas a su sustitución. Al incentivar prácticas sostenibles tanto en el ámbito público como privado, la ley busca reducir significativamente el impacto ambiental del plástico, fomentando un cambio estructural hacia sistemas más limpios, eficientes y resilientes. (Ley N.º 9786, 2023).

Capítulo 3: Marco metodológico

Este capítulo describe el enfoque metodológico adoptado para el desarrollo de la presente investigación, cuyo objetivo es analizar la viabilidad del uso de plásticos reciclados en mezclas asfálticas. En primera instancia, se detalla el tipo de investigación, su naturaleza mixta (cuantitativa y cualitativa) y su carácter descriptivo y explicativo, lo cual permite abordar tanto la identificación de materiales como el análisis de sus efectos. Seguidamente, se presentan los sujetos y fuentes de información utilizadas, enfocándose en documentos científicos y técnicos seleccionados bajo criterios de relevancia, calidad y actualidad. Asimismo, se especifica el tipo de muestra no probabilística empleada, justificada por el enfoque documental del estudio. Posteriormente, se exponen las técnicas e instrumentos de recolección de datos aplicados, tales como revisión bibliográfica, análisis de contenido y uso de fichas y bases de datos especializadas. Finalmente, se incluye una descripción del enfoque mixto aplicado a los objetivos específicos y se presenta el cronograma de trabajo desarrollado para la ejecución del estudio.

3.1. Tipo de investigación

3.1.1 Naturaleza de la Investigación (Mixta)

Boukidis & Rutberg (2018) definen, que existen dos metodologías investigativas que son investigaciones cuantitativas y cualitativas, cada una de estas investigaciones tiene características propias que se diferencian entre las mismas (p. 209).

Rasinger (2020) menciona que las investigaciones cuantitativas, son más conocidas que las cualitativas, este método es más directo, ya que se encarga de recolectar, analizar e interpretar los datos que se obtienen con la finalidad de responder a las preguntas o corroborar las hipótesis que se plantean. Este tipo de investigaciones se basan en mensuraciones numéricas, contar los datos recolectados y por último emplear la parte estadística para calcular con mayor certeza (p 35).

Por otra parte, Rasinger (2020) menciona, que las investigaciones cualitativas se preocupan por estudiar el entorno de sucesos y se enfocan en todos los hechos reales que suceden con los seres vivos, en la cual se involucran, estiman y realizan experimentos (p. 36).

Después de establecer previamente la naturaleza tanto cuantitativa como cualitativa de la investigación, el actual proyecto de investigación en sus tres objetivos específicos se orientará hacia un enfoque mixto. Esto implica la recopilación de datos, análisis y verificación de valores números y descriptivos reales que estudian el entorno de sucesos.

3.1.2 Objetivos Cuantitativos

3.1.2.1 La identificación de tipos de plásticos. (Objetivo específico 1) la identificación de los tipos de plásticos empleados en mezclas asfálticas se considera un análisis cuantitativo porque implica la recolección y procesamiento de datos numéricos relacionados con porcentajes de plástico añadidos a las MAC.

3.1.2.2 El análisis del impacto mecánico. (Objetivo específico 2) requiere mediciones, ensayos de laboratorio, evaluación de propiedades físicas como resistencia a la humedad, daño por fatiga, durabilidad y análisis estadístico de resultados. Este tipo de análisis se basa en datos numéricos y objetivos.

3.1.3 Objetivos Cualitativos

3.1.3.1 Analizar el Impacto ambiental. (Objetivo específico 2) aunque puede incluir métricas ejemplo la huella de carbono, también, requiere interpretación de sostenibilidad, regulaciones y aspectos socioambientales.

3.1.3.3 Las recomendaciones prácticas. (Objetivo específico 3) generalmente se basan en interpretación, juicio técnico y evaluación contextual, aspectos que pertenecen al enfoque cualitativo.

3.1.4 Carácter de la Investigación (Descriptivo y Explicativo)

Según Batista, Fernández & Hernández (2014) con los estudios descriptivos se busca especificar las propiedades, las características y los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis. Es decir, únicamente pretenden medir o recoger

información de manera independiente o conjunta sobre los conceptos o las variables a las que se refieren, esto es, su objetivo no es indicar cómo se relacionan éstas.

Por otro lado, los estudios explicativos van más allá de la descripción de conceptos o fenómenos o del establecimiento de relaciones entre conceptos; es decir, están dirigidos a responder por las causas de los eventos y fenómenos físicos o sociales. Como su nombre lo indica, su interés se centra en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se manifiesta o por qué se relacionan dos o más variables (pp. 92-95).

La presente investigación se justifica como un estudio de carácter descriptivo y explicativo, ya que, en primer lugar, busca identificar y caracterizar los tipos de plásticos reciclables aptos para su incorporación en mezclas asfálticas, lo cual responde a un enfoque descriptivo al centrarse en detallar sus propiedades y condiciones de uso sin establecer relaciones causales. En segundo lugar, asume un enfoque explicativo al analizar el impacto mecánico y ambiental que genera la inclusión de estos plásticos en las mezclas, con el propósito de comprender las causas y efectos derivados de su aplicación. Esta combinación metodológica permite no solo conocer el fenómeno, sino también entender su comportamiento y aportar recomendaciones técnicas fundamentadas.

3.2 Sujetos y Fuentes de Información

3.2.1 Sujetos de Información

En esta investigación, al tratarse de una revisión bibliográfica, los sujetos de información no son personas u organizaciones entrevistadas directamente, sino que están representados por fuentes documentales relevantes. Estos documentos fueron elaborados por expertos, investigadores y técnicos en el campo de la ingeniería civil, la gestión de residuos plásticos y el diseño de mezclas asfálticas. Por tanto, los sujetos son los autores y entidades responsables de los estudios consultados.

3.2.2 Fuentes de Información: Primarias o Secundarias.

Las fuentes de información primarias corresponden a documentos que presentan investigaciones originales, estudios que contienen resultados y análisis técnicos elaborados directamente por sus autores respaldados con evidencia propia o terceros referenciados.

En el caso de esta tesis, se seleccionaron diez fuentes primarias entre las que se incluyen artículos científicos, tesis académicas e informes técnicos, todos ellos centrados en el uso de plásticos reciclados como aditivos en mezclas asfálticas.

La elección de estas fuentes se basó en criterios específicos, tales como:

Relevancia del contenido con el tema de estudio, ya que abordan directamente la modificación de mezclas asfálticas con residuos plásticos.

Calidad científica, al tratarse de publicaciones en revistas especializadas, tesis con respaldo metodológico sólido y documentos técnicos reconocidos.

Cobertura geográfica, al incluir investigaciones tanto nacionales como internacionales.

Actualidad de la información, priorizando estudios publicados en los últimos 13 años, para asegurar la vigencia y relevancia de los datos utilizados.

A continuación, se presenta en la siguiente tabla una resumen de las fuentes primarias:

Tabla 7

Fuentes de información primarias

Nº	Tipo documento	Autor(es)	Año	País	Tema principal
1	Tesis	Pilatuña & Rodríguez	2021	Ecuador	Comparar las propiedades mecánicas Marshall de una mezcla asfáltica convencional versus una mezcla asfáltica modificada con PET.
2	Tesis	Charcape	2022	Perú	

					Efecto de polímeros reciclados en la estabilidad y flujo Marshall en pavimento asfáltico.
3	Tesis	Silvestre	2017	Perú	Comparación técnica y económica entre las mezclas asfálticas tradicionales y reforzadas con plástico reciclado.
4	Artículo científico	Aguiar, Corrales, Fernández, Loria, Reyes & Villegas	2012	Costa Rica	Métodos avanzados de análisis de ciencia de los materiales y nanomateriales utilizados en la modificación de asfaltos, misma reutilizó el plástico de bolsas de PEAD.
5	Artículo científico	Aguiar, Baldi, Cajina & Camacho	2021	Costa Rica	Evaluación de desempeño de la mezcla asfáltica modificada con residuos de PVC tipo blíster.
6	Tesis	Delgado & Solano	2019	Perú	Análisis de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente con la adición de plástico peletizado LDPE-2019.
7	Artículo científico	Aguiar, Cruz, Loria, Porras & Vargas	2015	Costa Rica	Materiales de desecho como modificantes de la mezcla asfáltica, se realiza un análisis y comparación de mezclas asfálticas originales y modificadas con materiales de desecho, tales como: el bumper (desecho de parachoques de automóviles) y el polipropileno.
8	Tesis	Villacís	2017	Costa Rica	Asfalto modificado con materiales de desecho" explora, la viabilidad de utilizar billetes de polipropileno (PP) y policloruro de vinilo (PVC).
9	Artículo científico	Gómez, Loría, Thompsom & Zamora	2023	Costa Rica	Aplicación de un agregado de resina pre-condicionado hecho de plástico

					reciclado como aditivo en mezcla asfáltica en caliente.
10	Tesis	Casas & Metaute	2009	Colombia	Desarrollo de una mezcla asfáltica utilizando residuos plásticos, específicamente carcasas de pantallas compuestas por ABS y diskettes elaborados PS.

Nota. Elaboración propia (2025).

3.3 Muestra y Población

3.3.1 Tipo de Muestra

Según Batista et al. (2024) categorizan las muestras en dos grandes ramas: las muestras no probabilísticas y las muestras probabilísticas.

En las muestras probabilísticas, cada integrante de la población cuenta con igual oportunidad de ser seleccionado, ya que la muestra se determina a partir de la definición clara de las características poblacionales y del tamaño requerido, aplicando un método de selección aleatorio o sistemático. En cambio, en las muestras no probabilísticas, la selección de los elementos no responde al azar, sino que está guiada por factores como los objetivos del estudio o las características específicas que el investigador considera relevantes para su análisis (pp. 175-176).

La muestra utilizada en esta investigación es no probabilística lo cual se justifica por el carácter documental y bibliográfico del estudio, la selección de documentos se realiza con base en criterios definidos como relevancia del contenido con el tema de estudio, calidad científica, cobertura geográfica y actualidad de la información. Esta estrategia es adecuada debido al enfoque documental del estudio, que analiza investigaciones sobre mezclas asfálticas modificadas con plásticos reciclados, permitiendo reunir información técnica especializada y pertinente para los objetivos planteados, sin necesidad de aplicar métodos de muestreo aleatorio ni buscar generalización estadística.

3.3.2 Descripción de la Muestra

En la Tabla 7 se muestra detalladamente la descripción de la muestra.

3.4 Instrumentos y Técnicas de Recolección de Datos

Para el desarrollo de esta investigación, se emplearon diversos instrumentos y técnicas de recolección de datos con el fin de recopilar información relevante y actualizada sobre las mezclas asfálticas modificadas con plástico reciclado. La metodología se basó principalmente en la revisión documental, la cual permite acceder a múltiples perspectivas y resultados de estudios previos.

3.4.1 Técnicas de Recolección:

3.4.1.1 Revisión Bibliográfica. Esta técnica consistió en la búsqueda, selección y análisis de documentos especializados relacionados con el tema de estudio. Se consultaron fuentes académicas y técnicas tanto impresas como digitales.

3.4.1.2 Análisis de Contenido. Se aplicó para interpretar y sintetizar la información obtenida de las diferentes fuentes, permitiendo identificar patrones, enfoques metodológicos, resultados experimentales y conclusiones relevantes sobre el uso de plásticos reciclados en mezclas asfálticas.

3.4.2 Instrumentos Utilizados:

3.4.2.1 Fichas Bibliográficas y de Contenido. Se utilizaron para registrar de manera sistemática los datos más relevantes de cada fuente consultada, tales como autores, títulos, metodologías empleadas y hallazgos principales.

3.4.2.2 Bases de Datos Académicas. Se accedió a plataformas como repositorios de universidades y Google Académico, las cuales proporcionaron acceso a tesis, artículos científicos, reportes, y revistas especializadas.

3.4.2.3 Videos y Documentales Técnicos. Se incorporaron como fuentes complementarias para observar procesos experimentales y aplicaciones prácticas.

3.4.2.4 Comentarios y Foros Especializados. Se consideraron para conocer opiniones y experiencias de expertos y profesionales del sector.

3.4.3 Diseño de instrumentos

El diseño de los instrumentos utilizados en esta investigación responde a la necesidad de obtener información precisa, válida y pertinente en relación con las variables definidas en la matriz de investigación expuesta en el capítulo 1. Dado el enfoque mixto de la investigación, se elaboraron instrumentos tanto para el análisis cuantitativo como cualitativo, con base en los indicadores relacionados con el desempeño mecánico, la sostenibilidad ambiental y la incorporación de plásticos reciclados en mezclas asfálticas.

Para la recolección de datos cuantitativos, se procedió a la extracción bibliográfica y de contenido técnico, las cuales permitieron sistematizar la información proveniente de estudios previos, artículos científicos, normas técnicas y tesis relacionadas. Se incluyeron campos para registrar variables como tipo de plástico utilizado, método de incorporación (húmedo o seco), porcentaje de adición, resultados de pruebas de estabilidad Marshall, módulo dinámico, deformación permanente, fatiga, y estimaciones de huella de carbono.

En el caso del análisis cualitativo, se aplicó una matriz de análisis documental que permitió identificar patrones, ventajas, limitaciones y criterios de selección de plásticos reciclados con potencial para el uso vial. Este análisis se fundamentó en criterios como sostenibilidad, viabilidad técnica y replicabilidad, permitiendo fortalecer la triangulación de los datos.

Asimismo, se consideró el uso de instrumentos complementarios como revisión de bases de datos científicas especializadas, videos técnicos, manuales de diseño de mezclas asfálticas (Marshall y Superpave®), y foros especializados en ingeniería vial. Todos los instrumentos fueron elaborados con base en los indicadores descritos en la matriz de variables: resistencia a la fatiga, vida útil prolongada, porcentaje de adición de plástico reciclado y reducción del impacto ambiental (emisiones de CO_2, volumen de desechos).

3.4.4 Procedimiento de intervención

El procedimiento de intervención consistió en la recolección sistemática de información a partir de fuentes documentales especializadas, así como en el análisis comparativo de estudios de caso aplicados a mezclas asfálticas modificadas con residuos plásticos. La recolección de datos se realizó de forma estructurada mediante el uso de los instrumentos previamente diseñados, en concordancia con los objetivos e indicadores definidos.

La muestra seleccionada correspondió a investigaciones nacionales e internacionales, tesis académicas, publicaciones técnicas y artículos científicos que aplicaron ensayos de desempeño a mezclas con diferentes tipos de plásticos (PET, LDPE, HDPE, PP, ABS, PS, Resin8, entre otros). Estas fuentes fueron abordadas mediante revisión sistemática bajo criterios de inclusión relacionados con el año de publicación, relevancia temática, disponibilidad de resultados cuantificables y relación directa con el contexto constructivo de Costa Rica.

Para garantizar la validez del proceso, se aplicaron procedimientos de análisis documental como la codificación temática, identificación de unidades de análisis y clasificación de resultados por variable (estabilidad, fluidez, módulo dinámico, resistencia al daño por humedad, vida útil proyectada, entre otros).

3.5 Estrategia de Análisis de Datos.

3.5.1 Presentación y análisis de los datos

Para el análisis de los datos recolectados en esta investigación se emplearán metodologías diferenciadas según el enfoque del instrumento, distinguiendo entre los datos cuantitativos y cualitativos.

En el caso de los datos cuantitativos, la información será procesada y organizada mediante el uso del programa Microsoft Excel, dentro del ambiente Windows. Este software permitirá la elaboración de gráficos de barras como método uniforme para la visualización de los resultados obtenidos en cada uno de datos incluidos en los instrumentos aplicados. El uso de este tipo de gráfico facilitará la interpretación

comparativa de la información, permitiendo evidenciar comportamientos mecánicos en diferentes tipos de plásticos reciclados para mezclas asfálticas modificadas.

Por otra parte, en el tratamiento de la información cualitativa, se empleará el recurso de SmartArt en Microsoft Word como herramienta para la representación gráfica. A través de esta función se construirán esquemas conceptuales que reflejen el impacto ambiental. Estos esquemas serán elaborados siguiendo el enfoque de la triangulación metodológica, la cual se entiende como la estrategia que permite integrar diversas fuentes de información y perspectivas analíticas para enriquecer la comprensión del fenómeno estudiado y aumentar la validez de los resultados.

3.5.2 Cronograma

CRONOGRAMA DE PROYECTO CON GRÁFICO DE GANTT

ID DE TAREA	TÍTULO DE LA TAREA	Enero				Febrero				Marzo				Abril				Mayo				Junio				Julio			
		SEMANA				SEMANA				SEMANA				SEMANA				SEMANA				SEMANA				SEMANA			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Capítulo 1: Introducción																												
1.1	Planteamiento del Problema de Investigación																												
1.1.1	Contexto																												
1.1.2	Justificación																												
1.1.3	Problema de Investigación																												
1.1.4	Estado del Arte																												
1.2	Objetivos de la Investigación																												
1.3	Las Variables o Categorías de Análisis																												
1.4	Alcances																												
1.5	Formulación de la Hipótesis de la Investigación																												
2	Capítulo 2: Marco Teórico																												
2.1	Estado del Conocimiento																												
2.2	Estado de la Cuestión																												
2.3	Marco legal																												
3	Capítulo 3: Marco metodológico																												
3.1	Tipo de Investigación																												
3.2	Sujetos y Fuentes de Información																												
3.3	Muestra y Población																												
3.4	Instrumentos y Técnicas de Recolección de Datos																												
3.5	Estrategia de Análisis de Datos																												
4	Capítulo 4: Análisis e Interpretación de los Resultados																												
4.1	Presentación de los Resultados para las Variables o Categorías de Análisis																												
4.2	Análisis de los Resultados para las Variables o Categorías de Análisis																												
4.3	Aceptación o Rechazo de la Hipótesis																												
5	Capítulo 5: Limitaciones, Conclusiones y Recomendaciones																												
5.1	Limitaciones																												
5.2	Conclusiones																												
5.3	Recomendaciones																												
	Capítulo 6: Propuesta de investigación																												

Capítulo 4: Análisis e Interpretación de los Resultados

Este capítulo presenta y analiza los principales resultados obtenidos en relación con los objetivos específicos de la investigación. Se inicia con la identificación de los tipos de plásticos reciclados utilizados en mezclas asfálticas, evaluando sus porcentajes de incorporación y características principales. Posteriormente, se exponen los impactos mecánicos que generan dichos materiales en las mezclas, evaluados mediante ensayos como Estabilidad y Flujo Marshall, así como metodologías Superpave para deformación permanente, grado de desempeño (PG) y resistencia a la fatiga. Además, se analiza el impacto ambiental asociado al uso de plásticos reciclados, en comparación con materiales vírgenes, considerando indicadores como reducción de residuos, emisiones de CO_2 y consumo energético. Finalmente, se discute la aceptación o rechazo de la hipótesis planteada, con base en los datos obtenidos, y se ofrecen recomendaciones prácticas orientadas a la sostenibilidad de la infraestructura vial.

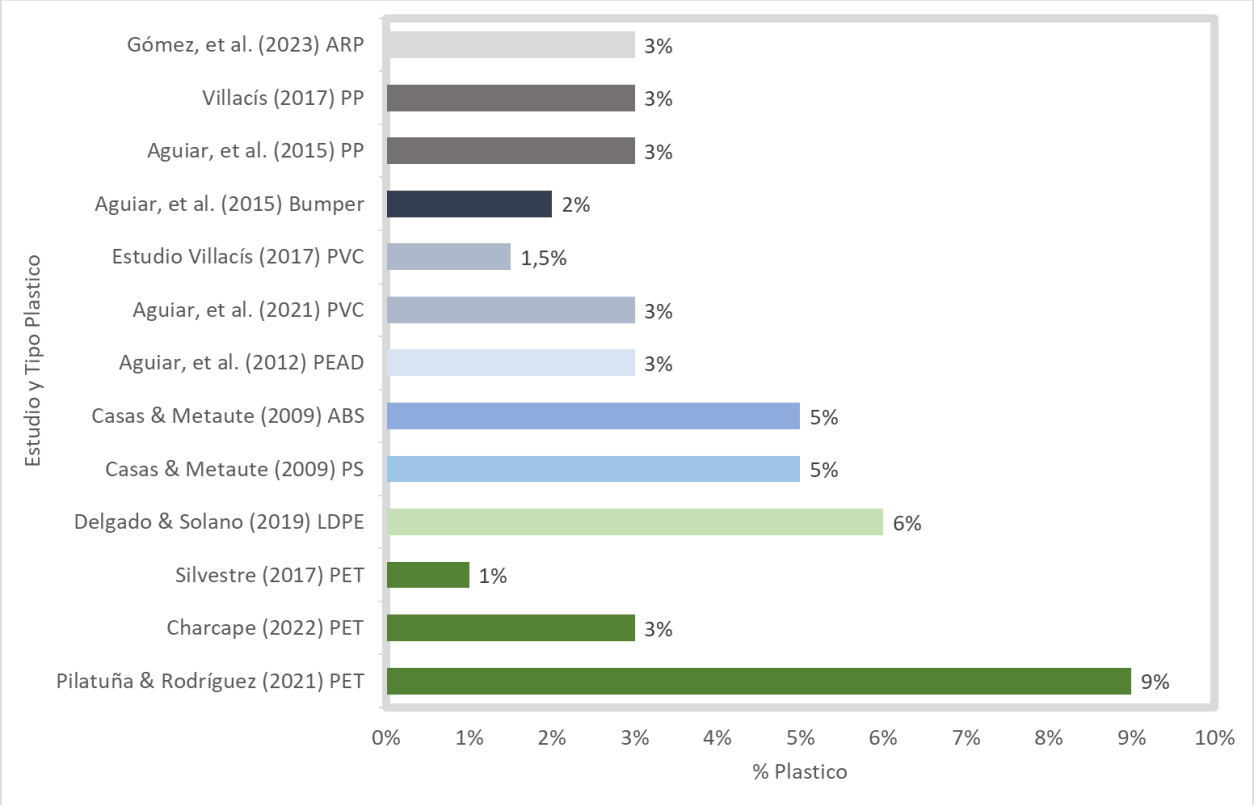
4.1 Presentación de los Resultados para las Variables o Categorías de Análisis

4.1.1 Presentación de Identificación de Tipos de Plástico

En relación con el primer objetivo de la investigación, orientado a identificar los tipos de plásticos aptos para su incorporación en mezclas asfálticas, se presentan a continuación los resultados obtenidos mediante el análisis de datos recopilados. Este análisis abarca tanto la clasificación de los plásticos utilizados como sus respectivos porcentajes en la composición de asfaltos y mezclas asfálticas en caliente (MAC).

Figura 70

Presentación de tipos y porcentajes de plásticos empleados en asfaltos y mezclas asfálticas en caliente, según datos Recopilados en la investigación



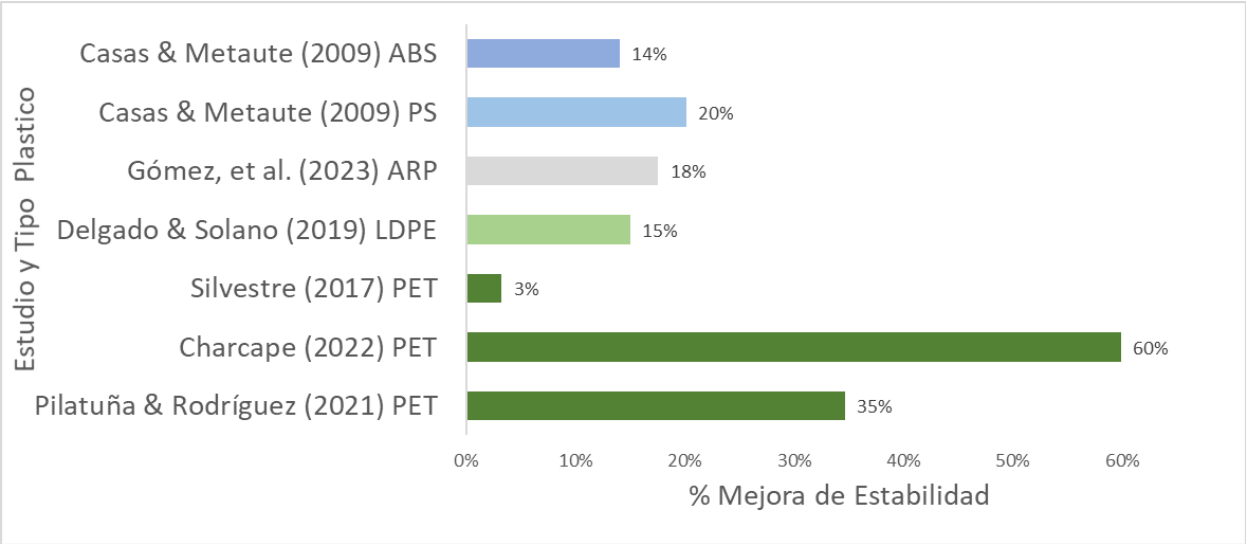
Nota. Elaboración propia (2025).

4.1.2 Presentación de Impacto Mecánico / Estabilidad Marshall

En relación con el segundo objetivo de la investigación, se evalúa su estabilidad mediante el método Marshall, a continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante el análisis de datos recopilados evidenciando un desempeño estructural más eficiente.

Figura 71

Presentación de mejora de estabilidad Marshall, mezcla asfáltica control vs mezcla asfáltica modificada



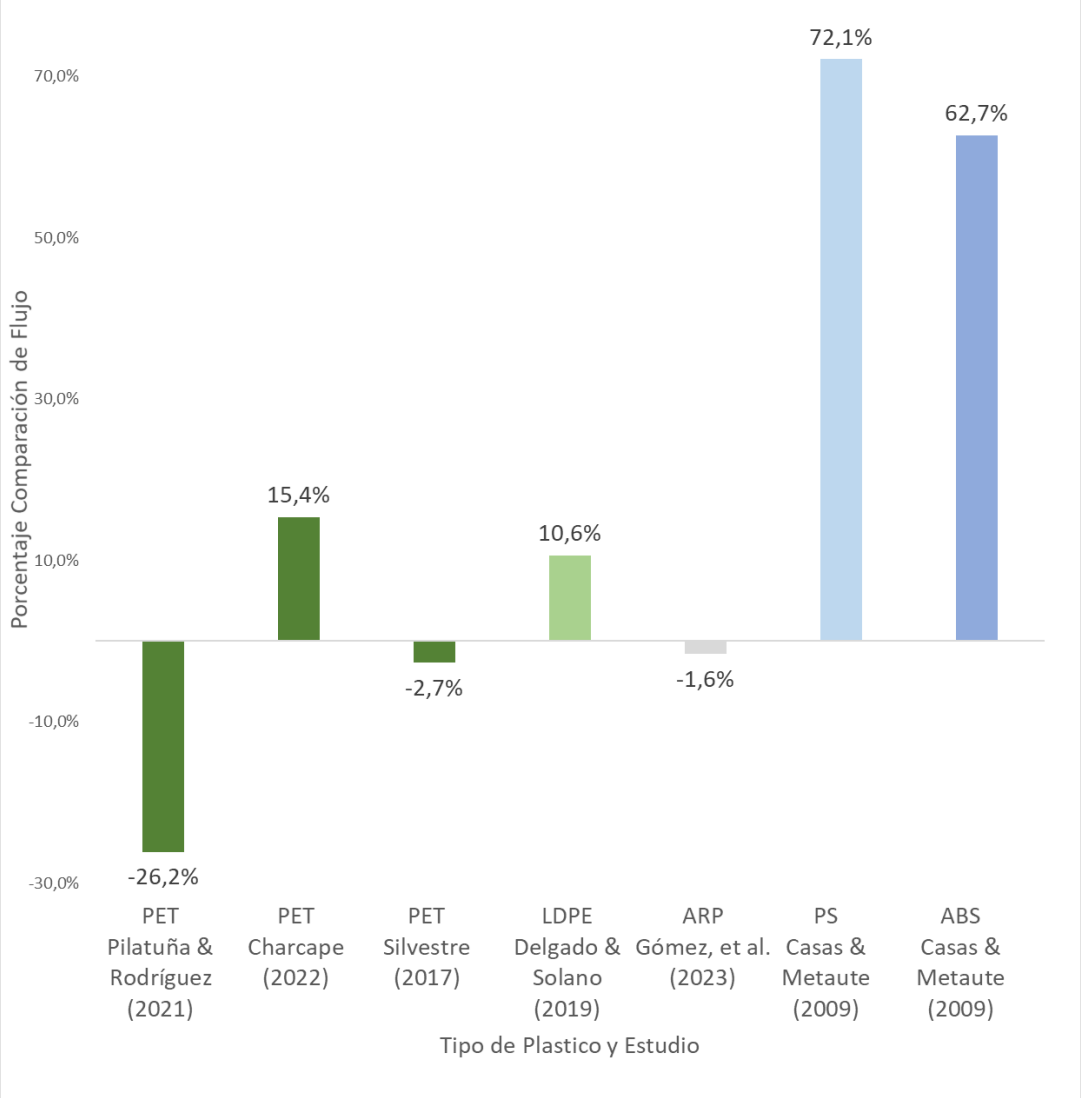
Nota. Elaboración propia (2025).

4.1.3 Presentación de Impacto Mecánico / Flujo Marshall

En continuidad, con el segundo objetivo de la investigación, se evalúa el flujo mediante el método Marshall, a continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante el análisis de datos recopilados evidenciando un desempeño variado.

Figura 72

Presentación de flujo Marshall, mezcla asfáltica control vs mezcla asfáltica modificada



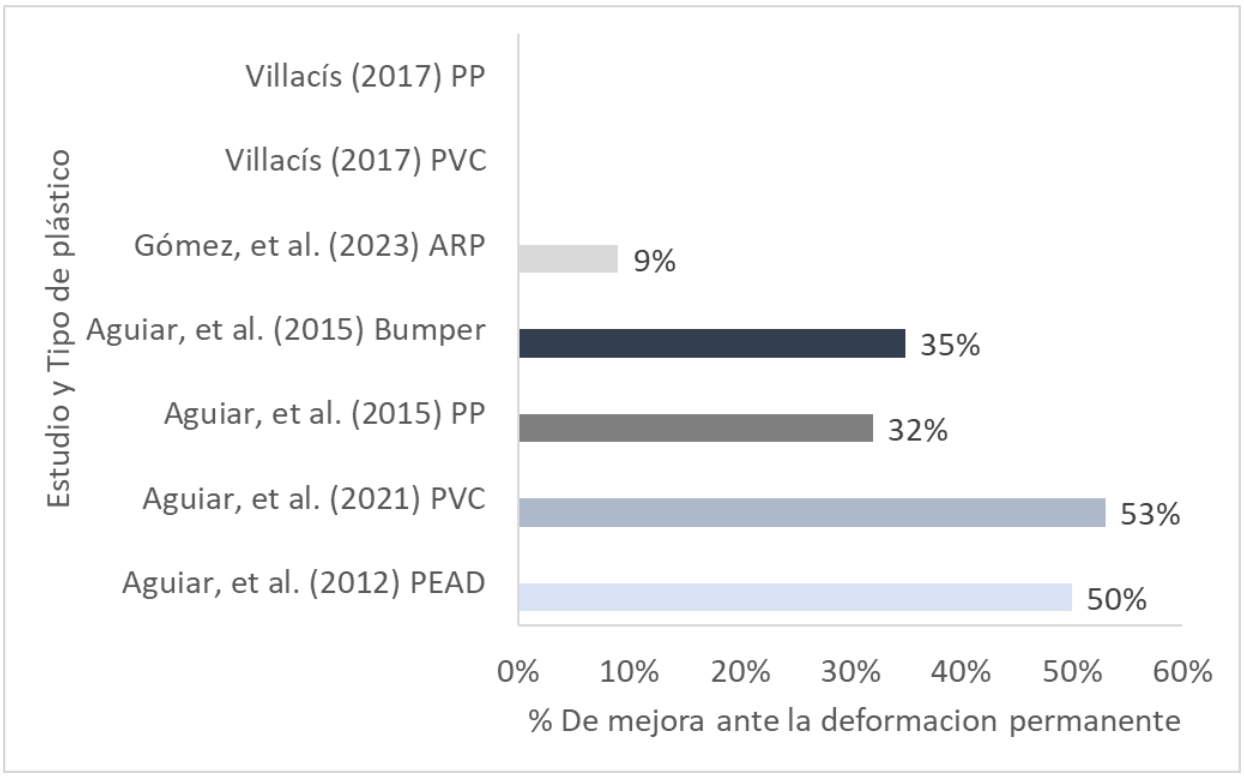
Nota. Elaboración propia (2025).

4.1.4 Presentación de Impacto Mecánico / Deformación Permanente metodología Superpave

En continuidad, con el segundo objetivo de la investigación, se evalúa la deformación permanente con la metodología Superpave, a continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante el análisis de datos recopilados evidenciando un desempeño estructural más eficiente.

Figura 73

Presentación ante la deformación permanente, mezcla asfáltica control vs mezcla asfáltica modificada



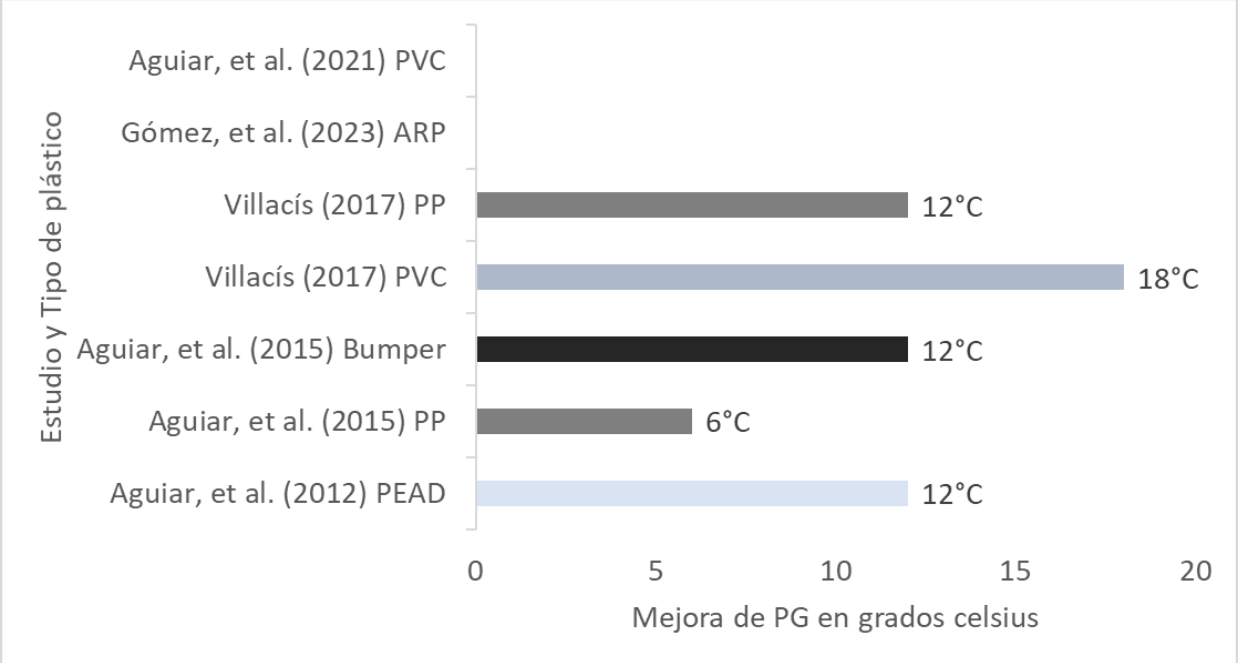
Nota. Elaboración propia (2025).

4.1.5 Presentación de Impacto Mecánico / grado de desempeño (PG) metodología Superpave

En continuidad, con el segundo objetivo de la investigación, se evalúa el grado de desempeño (PG) con la metodología Superpave, a continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante el análisis de datos recopilados evidenciando un desempeño más eficiente.

Figura 74

Presentación del grado de desempeño (PG), mezcla asfáltica control vs mezcla asfáltica modificada



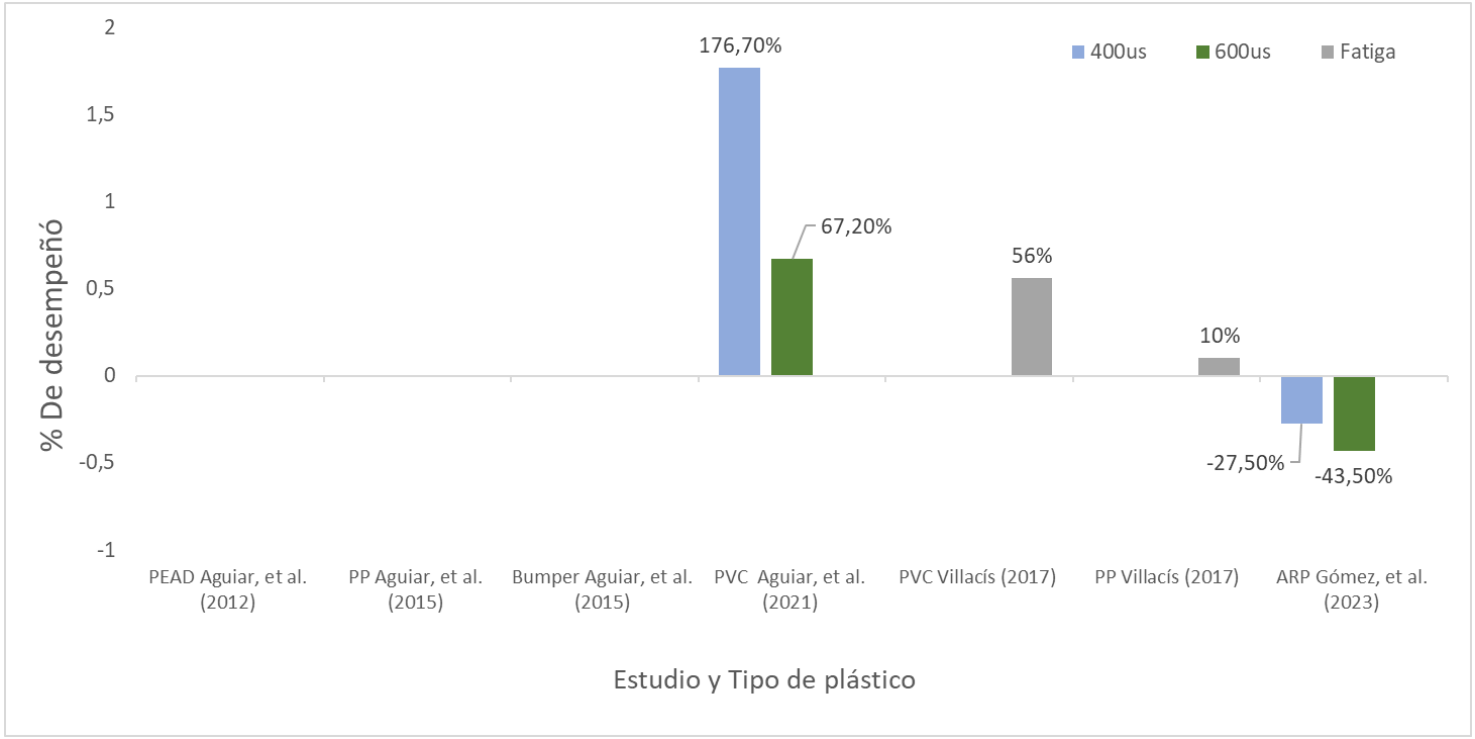
Nota. Elaboración propia (2025).

4.1.6 Presentación de Impacto Mecánico / fatiga metodología Superpave

En continuidad, con el segundo objetivo de la investigación, se evalúa la fatiga con la metodología Superpave, a continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante el análisis de datos recopilados tanto por el ensayo de fatiga 4 puntos a 400us y 600us, como los resultados generales de fatiga según indicados en las investigaciones.

Figura 75

Presentación ante la fatiga de mezcla asfáltica control vs mezcla asfáltica modificada



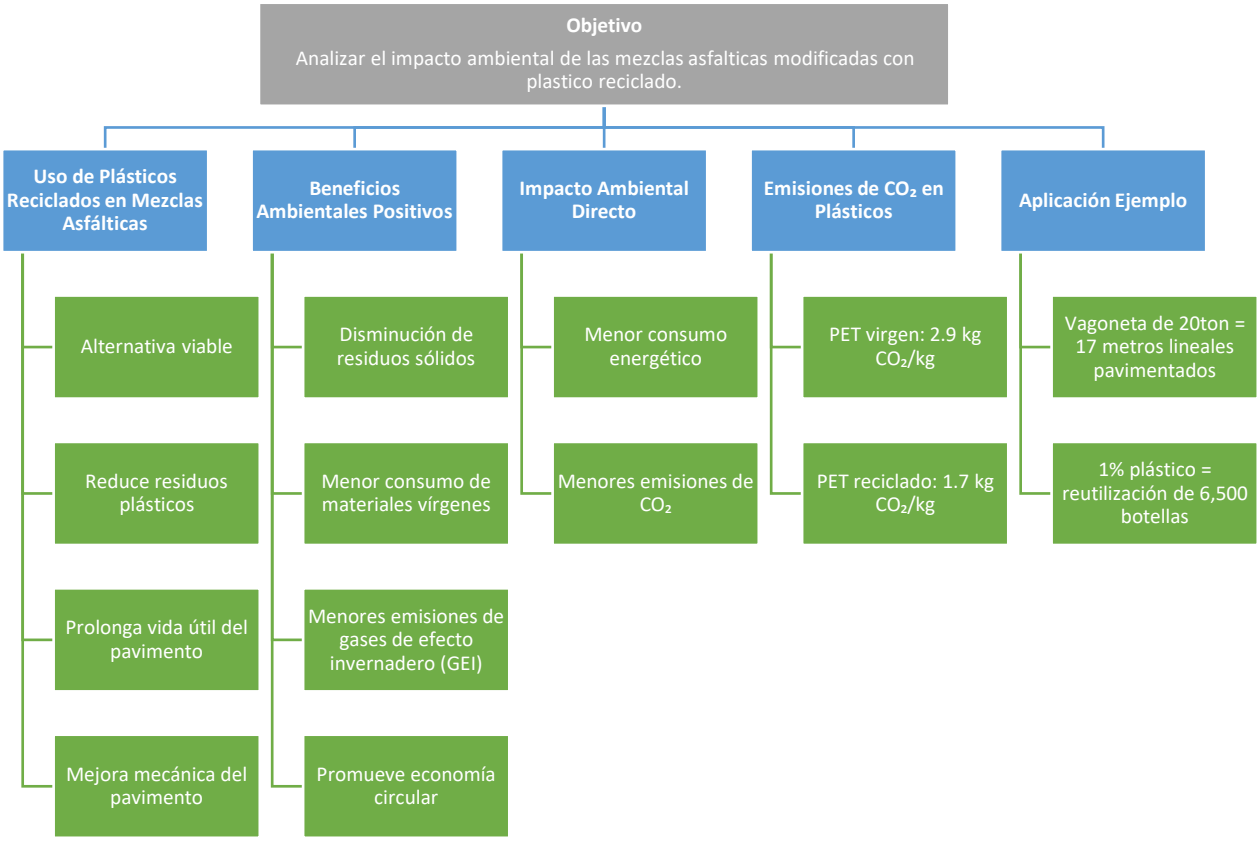
Nota. Elaboración propia (2025).

4.1.7 Presentación de Impacto Ambiental

En relación con el segundo objetivo de la investigación, se evalúa el impacto ambiental, a continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante investigaciones recopiladas.

Figura 76 Presentación impacto ambiental

Presentación impacto ambiental



Nota. Elaboración propia (2025).

4.2 Análisis de los resultados para las variables o categorías de análisis

4.2.1 Análisis de Identificación de Tipos de Plástico

En la figura 70 se muestra el análisis comparativo de diversas investigaciones que evidencia una notable variedad de tipos de plásticos empleados en la modificación de mezclas asfálticas. Entre ellos, el PET (tereftalato de polietileno) destaca como el polímero más recurrente, lo que refleja tanto su alta disponibilidad en residuos sólidos urbanos como su buena compatibilidad con el ligante asfáltico.

En cuanto a los porcentajes de inclusión, se observa que la mayoría de los estudios optan por concentraciones de plástico en el rango del 1% al 9%, siendo el 3% el valor más comúnmente aplicado. Esta preferencia sugiere una búsqueda de equilibrio entre la mejora de propiedades mecánicas y la estabilidad de la mezcla.

Destaca, el uso de materiales reciclados no convencionales, como plásticos de parachoques de autos (bumper) y agregado de resina pre-condicionada (ARP). Estos materiales no se encuentran codificados por la Sociedad de la Industria del Plástico (SPI), lo cual evidencia un enfoque más experimental e innovador por parte de los investigadores, orientado a aprovechar residuos plásticos tanto postindustriales como posconsumo, evidenciando prácticas de economía circular.

Este conjunto de estudios refleja un esfuerzo sistemático por incorporar plásticos con diversas propiedades físicas y químicas, permitiendo así evaluar su comportamiento dentro de la mezcla asfáltica.

4.2.2 Análisis de Impacto Mecánico / Estabilidad Marshall

Los datos graficados en la figura 71 evidencian una mejora significativa en la estabilidad Marshall de las mezclas asfálticas cuando se incorporan distintos tipos de plástico reciclado como modificadores. El análisis cuantitativo revela que el PET (tereftalato de polietileno) presenta los resultados más destacados, con incrementos de estabilidad del 60% (Charcape), 35% (Pilatuña & Rodríguez) y 3% (Silvestre), lo que indica una variabilidad considerable que podría estar asociada a diferencias en el tipo de asfalto base, dosificación o condiciones de ensayo.

El LDPE (polietileno de baja densidad) muestra una mejora del 15%, resultado consistente con su capacidad para mejorar la flexibilidad y cohesión de la mezcla. Por su parte, el agregado ARP (resina pre-condicionada) alcanza un 18% de mejora, posicionándose como una opción prometedora en la reutilización de residuos plásticos no convencionales.

Los polímeros rígidos como el PS (poliestireno) y el ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) también generan mejoras importantes del 20% y 14%, respectivamente, lo que sugiere su efectividad en la mejora de la resistencia mecánica de la mezcla.

En conjunto, los resultados muestran que la adición de plásticos puede aumentar significativamente la estabilidad estructural de la mezcla asfáltica, con mejoras que oscilan entre un 3% y un 60%. Esta amplia variabilidad subraya la importancia de optimizar el tipo de plástico, su tratamiento previo, y la dosificación para maximizar el desempeño mecánico y la sostenibilidad del pavimento.

4.2.3 Análisis de Impacto Mecánico / Flujo Marshall

Los resultados en la figura 72 muestran que la incorporación de plásticos en mezclas asfálticas puede generar tanto incrementos como reducciones en el flujo Marshall, dependiendo del tipo de polímero utilizado. Esta variabilidad es crucial, ya que el flujo está asociado con la deformabilidad de la mezcla y su comportamiento ante cargas repetitivas.

En cuanto al PET (tereftalato de polietileno), los resultados son dispares: mientras que el estudio de Charcape reporta un aumento del 15,4%, otros como Pilatuña & Rodríguez y Silvestre muestran reducciones del -26,2% y -2,7%, respectivamente. Esto sugiere que el comportamiento del PET puede variar significativamente según el proceso de incorporación, dosificación o condiciones de ensayo.

El LDPE (polietileno de baja densidad) muestra un efecto positivo moderado con un incremento del 10,6% en el flujo, lo que podría indicar una mejora en la flexibilidad de la mezcla.

En contraste, el ARP (agregado de resina pre-condicionada) presenta una ligera reducción del -1,6%, lo que indica un comportamiento similar al de la mezcla convencional, sin mejoras o deterioros destacables en términos de deformabilidad.

Los mayores aumentos en el flujo se registran con plásticos rígidos como el PS (poliestireno) y el ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), con incrementos del 72,1% y 62,7%, respectivamente. Estos resultados sugieren que estos polímeros, al incorporarse, incrementan notablemente la capacidad de deformación de la mezcla, lo cual puede ser beneficioso o contraproducente dependiendo del contexto estructural del pavimento.

Los efectos del plástico sobre el flujo Marshall son altamente dependientes del tipo de polímero. Se observa un rango de variación desde -26,2% hasta 72,1%, lo cual resalta la necesidad de una selección cuidadosa del tipo de residuo plástico según las propiedades mecánicas deseadas en el diseño de la mezcla.

4.2.4 Análisis de Impacto Mecánico / Deformación Permanente metodología Superpave

Los resultados obtenidos en la figura 73 de las investigaciones analizadas demuestran una mejora sustancial en la resistencia a la deformación permanente de las mezclas asfálticas al incorporar distintos tipos de plásticos reciclados como modificadores, evaluados bajo el método Superpave. Esta propiedad es esencial para mitigar el fenómeno de ahuellamiento en pavimentos sometidos a altas cargas y temperaturas.

El PVC (policloruro de vinilo) y el PEAD (polietileno de alta densidad) fueron los materiales que generaron los mayores niveles de mejora, reportó un incremento del 53% con PVC y un 50% utilizando PEAD. Estas cifras indican una excelente capacidad de estos materiales para reforzar la mezcla y mejorar su comportamiento estructural.

Por su parte, el polipropileno (PP) y los residuos de parachoques (Bumper) mostraron mejoras intermedias, con aumentos del 32% y 35% respectivamente, lo cual indica un buen desempeño frente a la deformación plástica bajo carga repetitiva.

La incorporación ARP (agregado de resina pre-condicionada), reflejó una mejora más moderada del 9%, aunque igualmente positiva en términos de estabilidad de la mezcla.

En cuanto al estudio de Villacís, aunque se indica el uso de PVC y PP, no se registran datos cuantitativos en cuanto a mejora de deformación permanente, por lo que no es posible incluirlos dentro del análisis comparativo directo. Sin embargo, su inclusión reafirma el interés técnico en estos polímeros dentro del campo de modificación asfáltica.

Los resultados reflejan mejoras que oscilan entre el 9% y 53%, evidenciando que el uso de plásticos reciclados puede ser una estrategia eficaz para aumentar la resistencia a la deformación permanente de las mezclas asfálticas.

4.2.5 Análisis de Impacto Mecánico / grado de desempeño (PG) metodología Superpave

En la figura 74 se muestra el análisis de los resultados obtenidos bajo el método Superpave revela que la incorporación de plásticos reciclados en mezclas asfálticas puede generar mejoras significativas en los grados de desempeño (PG) al comparar la mezcla de control y mezcla modificada con plásticos reciclados, un indicador clave de la capacidad de la mezcla para soportar temperaturas sin presentar fallos por deformación o fisuración.

El mayor incremento registrado corresponde al uso de PVC, con una mejora de 18 grados PG según el estudio de Villacís. Este resultado destaca el efecto estabilizador del PVC, especialmente en ambientes de alta temperatura, donde se requiere mayor resistencia al ahuellamiento.

Le siguen con mejoras notables de 12 grados PG los estudios que emplearon PEAD (polietileno de alta densidad), parachoques reciclados (Bumper) y PP (polipropileno) en el estudio de Villacís (2017). Estas

mejoras reflejan un comportamiento térmico más robusto de la mezcla, ampliando su rango operativo y contribuyendo a su durabilidad.

El estudio de Aguiar et al. con polipropileno (PP) reporta una mejora de 6 grados PG, que, aunque menor, sigue representando una ganancia técnica importante frente al comportamiento térmico de la mezcla convencional.

Por otro lado, no se reportaron datos cuantitativos en cuanto a mejora de grados PG en los estudios de Gómez et al. (ARP) ni en el de Aguiar et al. (PVC), lo que impide su incorporación en el análisis comparativo, aunque su mención sugiere que estas investigaciones también valoraron el potencial térmico de estos materiales.

Los resultados muestran mejoras que oscilan entre 6 y 18 grados PG, confirmando que los plásticos reciclados pueden actuar como modificadores efectivos del comportamiento térmico del ligante, contribuyendo a un mejor grado de desempeño de la mezcla asfáltica.

4.2.6 Análisis de Impacto Mecánico / fatiga metodología Superpave

En la figura 75 se muestra el comportamiento a la fatiga de las mezclas asfálticas modificadas con distintos tipos de plásticos reciclados fue evaluado mediante el método Superpave, específicamente a través del ensayo de fatiga a 4 puntos, considerando deformaciones controladas de 400 µs y 600 µs, así como valores generales de mejora respecto a la mezcla de control.

El PVC (cloruro de polivinilo) destaca como el material con mayor beneficio estructural. En el estudio de Aguiar et al., se registraron mejoras del 176,7% a 400 µs y 67,2% a 600 µs, lo que evidencia una sobresaliente resistencia a la fatiga bajo cargas repetitivas, especialmente en condiciones de menor deformación. De forma complementaria, el estudio de Villacís también reporta un aumento general del 56% en resistencia a la fatiga con PVC, consolidando su efectividad como modificador.

En cuanto al PP (polipropileno), aunque no se registran datos específicos en los ensayos a 400 y 600 µs en el estudio de Aguiar et al., el estudio de Villacís reporta una mejora del 10% en la resistencia general a la fatiga, lo cual sugiere una contribución moderada al desempeño estructural.

Respecto al uso de residuos de parachoques reciclados (Bumper) y PEAD (polietileno de alta densidad), los estudios de Aguiar et al. no reportan resultados cuantitativos, por lo que no es posible establecer una comparación directa, aunque su inclusión indica interés en evaluar su potencial como modificadores.

Por otro lado, el uso de ARP (agregado de resina pre-condicionada) mostró un comportamiento negativo en los ensayos de fatiga, la mezcla modificada presentó una disminución del -27,5% a 400 µs y del -43,5% a 600 µs respecto a la mezcla convencional, lo que sugiere una menor capacidad de la mezcla para resistir esfuerzos cíclicos sin deterioro prematuro.

Los resultados cuantitativos reflejan que los efectos del plástico reciclado sobre la fatiga de las mezclas asfálticas varían significativamente según el tipo de polímero. El PVC sobresale como el aditivo con mayor impacto positivo, mientras que el ARP presenta un efecto contrario. Estas diferencias resaltan la importancia de una adecuada selección del tipo de plástico para mejorar la durabilidad y vida útil del pavimento.

4.2.7 Análisis de Impacto Ambiental

En la figura 76 se muestra el análisis del impacto ambiental donde el uso de plásticos reciclados en mezclas asfálticas representa una alternativa ambientalmente viable para reducir tanto la contaminación por residuos plásticos como el uso excesivo de materiales vírgenes en infraestructura vial. La investigación demuestra que esta práctica contribuye significativamente a disminuir la cantidad de desechos enviados a vertederos, a la vez que mejora el desempeño mecánico del pavimento, lo cual prolonga su vida útil. Además, se identifican beneficios ambientales directos, como la reducción del consumo energético y de las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente cuando se incorpora dentro de un modelo

de economía circular. Un ejemplo señala que una vagoneta de 18 toneladas de mezcla asfáltica con solo un 1% de plástico puede reutilizar aproximadamente 6.500 botellas plásticas de 600 ml, demostrando un impacto ambiental positivo y cuantificable. Por otro lado, el análisis comparativo de emisiones revela que la producción de 1 kg de PET virgen puede liberar aproximadamente 2.9 kg de CO_2, mientras que el uso de PET reciclado reduce significativamente esta huella de carbono.

4.3 Aceptación o Rechazo de la Hipótesis

Con base en los hallazgos recopilados a lo largo de esta investigación, se puede afirmar que la hipótesis planteada ha sido mayoritariamente aceptada. Los estudios analizados respaldan que la incorporación de plásticos reciclados como aditivos en mezclas asfálticas flexibles tiene un efecto positivo tanto en el desempeño estructural del pavimento como en la reducción del impacto ambiental. Se ha comprobado que estas mezclas contribuyen significativamente a la gestión de residuos plásticos, disminuyen la dependencia de materiales vírgenes, y favorecen prácticas alineadas con los principios de economía circular, lo cual se traduce en una disminución de la huella de carbono en comparación con los materiales convencionales.

En cuanto a la vida útil del pavimento, varios estudios evidencian mejoras notables en la durabilidad general y resistencia a condiciones ambientales, lo que confirma el potencial de estas mezclas para prolongar la funcionalidad estructural de las vías. No obstante, al analizar específicamente la variable de resistencia a la fatiga, los resultados no fueron completamente uniformes. Si bien algunas investigaciones reportaron mejoras en este aspecto, otras evidenciaron resultados con ligeras disminuciones, dependiendo del tipo de plástico utilizado, el porcentaje incorporado y las condiciones de ensayo. Estas variaciones indican que la influencia del plástico reciclado sobre la fatiga del pavimento aún requiere un análisis más profundo y contextualizado.

Capítulo 5: Limitaciones, conclusiones y recomendaciones

5.1 Limitaciones

Durante el desarrollo de esta investigación se identificaron diversas limitaciones que afectaron tanto el alcance del estudio como la profundidad del análisis, las cuales es importante reconocer para contextualizar adecuadamente los resultados obtenidos y delimitar el campo de aplicación de las conclusiones.

En primer lugar, la investigación se limitó exclusivamente a fuentes documentales, recurriendo a revisiones bibliográficas sin la realización de ensayos experimentales propios en laboratorio. Esta condición implica que todos los resultados y conclusiones están basados en estudios previos y dependen de la validez y rigor metodológico de dichas investigaciones. Al no contar con pruebas propias, no fue posible corroborar los efectos mencionados en cada una de las investigaciones.

En segundo lugar, se identificó una limitación importante en cuanto a la disponibilidad de información sobre el impacto ambiental del uso de plásticos reciclados en mezclas asfálticas. La mayoría de los estudios analizados se enfocan predominantemente en variables mecánicas, como estabilidad, flujo o resistencia a la fatiga y deformación, dejando en segundo plano el análisis de emisiones de carbono, consumo energético o indicadores de sostenibilidad ambiental. Esto redujo la posibilidad de hacer comparaciones más completas o de cuantificar con precisión los beneficios ambientales asociados.

Finalmente, una tercera limitación se relaciona con la heterogeneidad metodológica entre las investigaciones recopiladas. Cada estudio empleó diferentes tipos de plásticos, porcentajes de incorporación, métodos de preparación de mezclas y condiciones de ensayo, lo cual dificulta la comparación directa de resultados y la obtención de patrones consistentes.

5.2 Conclusiones

Los resultados obtenidos a lo largo de esta investigación permiten concluir que el uso de plásticos reciclados como aditivos en mezclas asfálticas flexibles representa una estrategia técnica y ambientalmente viable para mejorar tanto el desempeño mecánico como la sostenibilidad de los pavimentos. A través del análisis bibliográfico exhaustivo de estudios recientes, se ha confirmado que diversos tipos de polímeros, en especial el PET, el PVC, el PP y el PEAD, poseen características que los hacen compatibles con el ligante asfáltico, permitiendo su incorporación en concentraciones que usualmente oscilan entre el 1% y el 9%, con mejoras significativas en variables clave como la estabilidad, la resistencia a la deformación permanente y el comportamiento térmico.

Desde el punto de vista estructural, los resultados respaldan la hipótesis inicial en la mayoría de los indicadores evaluados. La estabilidad Marshall se incrementó hasta en un 60% en ciertas mezclas modificadas, lo que confirma una mayor cohesión y resistencia a esfuerzos de carga vertical. De igual forma, el análisis de deformación permanente mediante el método Superpave reflejó mejoras de hasta un 53%, reforzando la idea de que estas mezclas pueden reducir el ahuellamiento y deformaciones permanentes, especialmente bajo climas cálidos o tráfico pesado. El grado de desempeño (PG) también se vio positivamente influenciado por la presencia de polímeros, particularmente el PVC, con aumentos de hasta 18 grados, lo cual indica una mayor capacidad de la mezcla para resistir condiciones altas temperatura.

En lo referente a la resistencia a la fatiga, si bien algunos estudios mostraron resultados altamente positivos como es el caso del PVC con mejoras del 176,7% y 67,2% a 400 y 600 µs respectivamente también, se evidenciaron casos donde la incorporación de ciertos plásticos, como el ARP (Agregado de Resina Pre-condicionada), generó un desempeño negativo. La mezcla modificada con ARP presentó una disminución del -27,5% a 400 µs y del -43,5% a 600 µs en comparación con la mezcla convencional, lo que sugiere que, bajo ciertas condiciones, su capacidad para resistir esfuerzos cíclicos puede ser limitada. Sin embargo,

estos resultados no deben interpretarse únicamente como una desventaja, sino como una evidencia de la complejidad y la necesidad de una adecuada caracterización de este aditivo.

El ARP representa un desarrollo innovador dentro del ámbito de la ingeniería vial. Se trata de un producto compuesto por una mezcla de residuos plásticos de diversos orígenes, denominado como “plástico trágico”. A diferencia de muchos aditivos experimentales analizados en estudios de laboratorio, el ARP no es solo una propuesta de investigación, sino un producto ya existente y aplicado en obras reales, tanto en proyectos públicos como en desarrollos privados. Esta condición lo posiciona como un insumo con un nivel de madurez tecnológica superior, lo cual representa una ventaja competitiva respecto a otros polímeros reciclados que aún se encuentran en fases exploratorias.

A pesar de los resultados mixtos en la variable de fatiga, los análisis en otras categorías, como estabilidad Marshall y resistencia estructural general, reflejan mejoras cuantificables con el uso de ARP. Su implementación en el campo demuestra que es posible reutilizar materiales plásticos complejos y no convencionales en la infraestructura vial, fomentando así prácticas coherentes con la economía circular, la gestión eficiente de residuos y la reducción del uso de materias primas vírgenes.

Desde el punto de vista ambiental, los resultados permiten concluir que la utilización de plásticos reciclados no solo contribuye a una gestión más eficiente de residuos sólidos, sino que también reduce la huella de carbono del proceso constructivo. El hecho de que una sola vagoneta de mezcla con 1% de plástico pueda reutilizar miles de botellas plásticas y que la producción de PET reciclado emita significativamente menos CO_2 que su versión virgen, refuerza el argumento de que esta práctica se alinea con los principios de sostenibilidad y economía circular. A pesar de que los estudios sobre impacto ambiental son más escasos y menos detallados en comparación con los mecánicos, la evidencia existente es suficiente para afirmar un beneficio ambiental cuantificable y positivo.

5.3 Recomendaciones

Tras la revisión bibliográfica de estudios enfocados en la modificación de mezclas asfálticas con plásticos reciclados, se identifican una serie de recomendaciones prácticas orientadas a su posible aplicación, aun cuando no se hayan realizado ensayos experimentales propios.

Se recomienda a las instituciones académicas y centros de investigación promover el desarrollo de estudios experimentales propios y que permitan validar estudios previos. La falta de ensayos de laboratorio limitó la posibilidad de corroborar directamente los beneficios y desventajas de cada tipo de plástico utilizado, por lo que resulta fundamental fomentar proyectos que combinen investigación documental con pruebas en laboratorio, especialmente en contextos climáticos y de carga vial similares a los nacionales.

Se sugiere a las entidades gubernamentales encargadas de infraestructura vial y gestión ambiental (como Ministerios de Obras Públicas, Municipalidades y Ministerios de Ambiente y Energía), considerar la inclusión de normativas técnicas que complemente de la ley Nº 9828, que faciliten la evaluación, regulación y uso de aditivos plásticos reciclados en proyectos viales. Esto implica la elaboración de protocolos que definan tipos de plásticos permitidos, rangos de dosificación y métodos de evaluación del desempeño tanto mecánico como ambiental. La adopción de estos materiales debe ir acompañada de mecanismos de control de calidad y seguimiento técnico para garantizar su efectividad y seguridad.

Se sugiere establecer plataformas de colaboración interinstitucional entre gobiernos locales, empresas constructoras, fabricantes de aditivos reciclados y universidades, con el objetivo de desarrollar proyectos piloto que validen el desempeño de mezclas asfálticas modificadas con materiales reciclados en diferentes contextos climáticos y de carga vehicular. Estas experiencias permitirán no solo generar datos técnicos fiables, sino también abrir espacios para que nuevas empresas y emprendimientos tecnológicos participen con soluciones innovadoras, promoviendo así una infraestructura vial más sostenible, resiliente y basada en economía circular.

Referencias

Aguiar, J., Leiva, F., Loría, L. & Vargas, A. (2014). *Evaluación de resistencia al agrietamiento por fatiga de mezclas asfálticas mediante el enfoque de energía disipada* (Número de informe LM-PI-UMP-019-R1). Unidad de Materiales y Pavimentos del PITRA-LanammeUCR. Disponible en: https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/134

Aguiar, J., Jiménez, J., Leiva, F. & Loría, L. (2015). *Metodología de diseño de mezclas asfálticas en caliente para Costa Rica* (Número de informe LM-PI-UMP-026-R1). Unidad de Materiales y Pavimentos del PITRA-LanammeUCR. Disponible en: https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/1352

Aguiar, J., Leiva, F., Salazar, J., Loria, L., Villegas, R. & Navas, A. (2015). *Materiales de desecho como modificantes de la mezcla asfáltica.* Unidad de Materiales y Pavimentos del PITRA-LanammeUCR. Disponible en: https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/548

Aguiar, J., Corrales, J., Fernández, W., Loria, L., Reyes, F. & Villegas, T. "*Métodos Avanzados de Análisis de Ciencia de dos Materiales y Nanomateriales Utilizados en la Modificación de Asfaltos*" Unidad de Materiales y Pavimentos del PITRA-LanammeUCR. Recuperado de: https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/915

Aguiar, J., Cruz, L., Loria, L., Porras, A. & Vargas, A. (2015) "*Materiales de Desecho como Modificantes de la Mezcla Asfáltica"* XVIII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Bariloche, Argentina. recuperado de: https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/548

Aguiar, J., Miranda, F. & Loría, L. (2017) *Daño por humedad en mezclas asfálticas* (Número de informe LM-PI-UMP-044-R4). Unidad de Materiales y Pavimentos del PITRA-LanammeUCR. Disponible en:

Aguiar, J., Baldi, A., Cajina, N. & Camacho, E. (2021), Evaluación de desempeño de la mezcla asfáltica modificada con residuos de PVC tipo blíster. *Infraestructura Vial, volumen 23 (número 42),* p.p. 13-22.

Aguilar, C., Andrés, V., Lagos, M., Movilla, D., Muñoz, O. & Raposeiras, A. (2021). Análisis de las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero y del Impacto Ambiental de la Producción de Mezclas Asfálticas Modificadas con Materiales Reciclados. Sostenibilidad, 13 (14), 8081. Recuperado de: h ttps://doi.org/10.3390/su13148081

Batista, P. Fernández, C. & Hernández, R. (2014). *Métodos de la investigación.* mcgraw-hill / interamericana editores, S.A. de C.V. Recuperado de https: https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=775008

Becerril, A. & Miranda, D. (2016). "*Procedimiento constructivo de pavimentos flexibles en la carretera : barranca larga en el Estado de Oaxaca*". (tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México: México. Recuperado de https://repositorio.unam.mx/contenidos/424545

Burrión, G. (2025). Guía completa sobre los tipos de plástico, su historia y el significado de los números en los envases. *Prensa Libre.* Recuperado de: https://www.prensalibre.com/guatemala/guia-completa-sobre-los-tipos-de-plastico-su-historia-y-el-significado-de-los-numeros-en-los-envases/

Bouikidis, C. & Rutberg, S. (2018). Focusing on the fundamentals: *A simplistic differentiation between qualitative and quantitative research. Nephrology Nursing Journal*, 45(2), 209-213.

Calabi, A., Mardones, L., Sánchez A, E. & Valdés, G. (2019). Evaluación de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas con la incorporación de fibras sintéticas de aramida y polipropileno. *Infraestructura Vial, volumen 20 (número 36),* p.p. 15-24. Disponible en: https://doi.org/10.15517/iv.v20i36.37729

Cervantes, V. & Sequeira, W. (2014). *Consistencia de los diseños de mezcla según la metodología Marshall.* Universidad de Costa Rica: San José Recuperado de https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/889

Charcape, (2022). "Efecto de Polímeros Reciclados en la Estabilidad y Flujo Marshall en Pavimento Asfáltico en el Anexo Cruce Cascas, la Libertad" (tesis de licenciatura). Universidad Cesar Vallejo: Perú. Recuperado de : https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/103259

Cosio, k. & La Torre, J. (2021). *"Mezcla asfáltica en caliente modificada con plástico reciclado para la determinación de sus propiedades mecánicas"* (tesis de licenciatura). Universidad Ricardo Palma: Perú. Recuperado de: https://repositorio.urp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/42c25396-9c32-4cf1-83c4-5c6281fd2b98/content

Contreras, D. & Zúñiga, J. (2020). "*Influencia de los desperdicios plásticos en las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas modificadas"* (tesis de licenciatura). Universidad Ricardo Palma: Perú. Recuperado de: https://repositorio.urp.edu.pe/entities/publication/e9b35282-8cd4-4e63-8216-90c86d6bee0d

Grajales, I. (2018). Costa Rica tira al mar 15 camiones de plástico por día. *Hoy en el TEC*. Recuperado de: https://www.tec.ac.cr/hoyeneltec/2018/06/05/costa-rica-tira-mar-15-camiones-plastico-dia#:~:text=De%20acuerdo%20con%20

González, E. 2022. "*Efecto de la granulometría de plásticos en las mezclas asfálticas modificadas con materiales de desecho"* (tesis de licenciatura). Universidad de Costa Rica: San José: recuperado de: https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/handle/123456789/20683

Gómez, G., Loría, L., Thompsom, D. & Zamora, D.(2023) *Aplicación de un agregado de resina pre-condicionado hecho de plástico reciclado como aditivo en mezcla asfáltica en caliente*. XXI CILA Congreso iberoamericano de asfalto. Recuperado de:

https://www.researchgate.net/publication/367236609_APLICACION_DE_UN_AGREGADO_DE_RESINA_PRE-_CONDICIONADO_HECHO_DE_PLASTICO_RECICLADO_COMO_ADITIVO_EN_MEZCLA_ASFALTICA_EN_CALIENTE

Gómez, G., Loria, L. & Ossa, A. (2025). Asfalto con RESING8: Caminos hacia la sostenibilidad [Webinar]. Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. https://lnkd.In/gx9vPmRs

Herrera, G. (2021) *"Correlación de los resultados de ensayo de flexión en 4 puntos con distintos parámetros del ensayo de flexión semicircular"* (tesis de licenciatura). Universidad de Costa Rica San José: Costa Rica. Recuperado de: https://cedi.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/1659/46/IC-8548.pdf

Flores, E. (2020). *"Influencia de los residuos plásticos reciclados al añadirlos a una mezcla asfáltica modificada en caliente, Trujillo"* (tesis de licenciatura). Universidad César Vallejo: Perú. Recuperado de: https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/57606/Flores_BEM-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Laboratorio Nacional de Vialidad (2021) Curso Laboratorista Vial, Mezclas Asfálticas, vol. V. Disponible en: https://vialidad.mop.gob.cl/areasdevialidad/laboratorionacional/Paginas/default.aspx

Lanamme. IT-MZ-07 (2022) *Diseño De Mezcla Asfáltica Utilizando El Método SUPERPAVE®* (Norma núm. IT-MZ-07). https://www.lanamme.ucr.ac.cr/images/ensayos/MezclasAsfalticas/Ficha-tecnica-IT-MZ-07-rev-MJA.pdf

Lanamme. IT-MZ-07 (2022) *Resistencia Retenida A La Tensión Diámetral Por El Daño Inducido Con Agua En Mezcla Asfáltica* (Norma núm. IT-MZ-16). https://www.lanamme.ucr.ac.cr/images/ensayos/MezclasAsfalticas/Ficha-tecnica-IT-MZ-16-rev-MJA.pdf

Ley 9828 (21 de mayo del 2020). Uso de materiales reutilizables en pavimentos y obras de infraestructura vial. 21 de junio del 2020. Alcance Nº 148 de la Gaceta.

Ley 9786 (26 de noviembre de 2019). Ley para combatir la contaminación por plástico y proteger el ambiente. 20 de abril de 2023. Alcance Nº 67 de la Gaceta.

López, S. (2020). *"Comportamiento de una mezcla asfáltica modificada con polímeros provenientes de botellas PET recicladas"* (propuesta de trabajo de grado). Universidad Militar Nueva Granada: Bogotá. Recuperado de: https://repository.unimilitar.edu.co/server/api/core/bitstreams/9581460e-d907-424a-bf34-99319c88328b/content

Madrid, C. (2021). *Aplicación de Fibra Sintética Forta-Fi en la Confección de Mezcla Asfáltica en Caliente para Postergar la Aparición de Grietas por Reflexión en Recapados Asfálticos* (tesis de licenciatura). Universidad Valparaíso: Chile. Recuperado de: https://repositoriobibliotecas.uv.cl/serveruv/api/core/bitstreams/3a4655e2-aa87-4847-b5a9-ebe25d5326fd/content

MAV (2016) Manual de Auscultación Visual de Pavimentos de Costa Rica, Ministerio De Obras Publicas Y Transportes, San José Costa Rica. Recuperado de: https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/857?locale-attribute=en

Pilatuña y Rodríguez, (2021). "Incorporación de plástico reciclado mediante vía húmeda en una mezcla asfáltica en caliente utilizando agregados pétreos del Cantón Guamote" (tesis de licenciatura). Universidad Nacional de Chimborazo: Ecuador. Recuperado de: http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/7535

PlasticsEurope (2005) Eco-profiles of the European Plastics Industry – Polyethylene Terephthalate (PET). Recuperado de: https://www.inference.org.uk/sustainable/LCA/elcd/external_docs/petb_31116f00-fabd-11da-974d-0800200c9a66.pdf

Rasinger, S. (2020). La investigación cuantitativa en lingüística: Una introducción. Ediciones Akal. Disponible en: https://n9.cl/4nj27.

Silvestre, F. (2017). *"Comparación técnica y económica entre las mezclas asfálticas tradicionales y reforzadas con plástico reciclado en la ciudad de lima-2017."* (tesis de licenciatura). Universidad César Vallejo: Perú. Recuperado de:

https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/1506/Silvestre_VDF.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Villacís, F. (2017). *"Asfalto Modificado con Materiales de Desecho"* (tesis de licenciatura). Universidad de Costa Rica: Recuperado de: https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/items/e54297cf-a547-49cf-985d-802e557d82ea/full