

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA



TESIS DE MAESTRIA

Incorporación de residuos plásticos en el diseño de mezclas
asfálticas calientes para solucionar problemas en deficiencias
de agregados.

Autor:

David Alonso Sepúlveda Valdez

Director de Tesis:

Dr. Julio Alberto Calderón Ramírez

Co-Director de Tesis:

Dr. José Manuel Gutiérrez Moreno

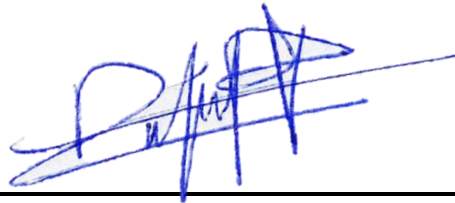
Tesis presentada como requisito para egreso a estudios de
Maestría en Ciencias
Laboratorio de Ingeniería Civil, Campus Mexicali

31 – 05 – 2024

Declaración de Autoría

Yo, David Alonso Sepúlveda Valdez, declaro que esta tesis titulada, “Incorporación de residuos plásticos en el diseño de mezclas asfálticas calientes para solucionar problemas en deficiencias de agregados” y el trabajo presentado en ella es mío. Confirmando que este trabajo enviado para evaluación es mío y se expresa en mis propias palabras. Cualquier uso que se haga dentro de las obras de otros autores en cualquier forma (por ejemplo, ideas, ecuaciones, figuras, texto, tablas, programas) se reconoce adecuadamente en cualquier momento de su uso. Se incluye una lista de las referencias empleadas.

Firma:

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'D. A. Sepúlveda', is written over a horizontal line.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que han hecho posible la realización de esta tesis y etapa en mi vida profesional.

En primer lugar, agradezco sinceramente a mi director el Dr. Julio Alberto Calderón Ramírez y codirector Dr. José Manuel Gutiérrez Moreno, quienes me extendieron la mano y brindaron esta oportunidad sin dudar. Su confianza en mí y su apoyo constante han sido fundamentales para llegar a este punto.

Un especial agradecimiento al M.I. Ricardo Cota Ramírez, sin cuya guía y experiencia no habría podido avanzar tanto en esta investigación. Su apoyo y paciencia fueron cruciales para poder ayudarme a culminar esta etapa tan importante de mi vida.

A todos aquellos profesores y compañeros, que estuvieron a mi lado desde el primer día brindándome sus conocimientos y guías.

A mis padres y hermanos, que me soportaron y apoyaron en los días llenos de trabajo y estrés. Su amor y comprensión fueron el aliciente que necesitaba para seguir adelante en los momentos más difíciles.

A mi novia, quien me alentó cuando creí que no podría terminar. Su apoyo incondicional y sus palabras de ánimo me dieron la fuerza necesaria para completar esta tarea y no rendirme en ningún punto.

A todos ustedes, les dedico con cariño y gratitud este trabajo, esperando que sea un reflejo del esfuerzo y la dedicación conjunta.



ÍNDICE

RESUMEN.....	9
I. MARCO INTRODUCTORIO.....	10
1.1 Introducción	10
1.2 Descripción de problemática.....	11
1.3 Objetivos de la investigación.....	12
1.3.1 General.....	12
1.3.2 Específicos.....	12
1.4 Hipótesis.....	12
1.5 Hipótesis nula	12
1.6 Justificación de investigación.....	13
II. MARCO TEÓRICO	14
2.1 Mezclas Asfálticas	14
2.1.1 Historia.....	14
2.1.2 Agregados minerales.....	15
2.1.3 Asfaltos.....	16
2.1.4 Tipos de mezclas asfálticas y aplicaciones	17
2.1.5 Diseños de mezclas asfálticas	18
2.2 Plástico	19
2.2.1 Historia.....	20
2.2.2 Reciclaje	21
2.3 Tipos de plásticos	22
2.3.1 Tereftalato de polietileno (PET o PETE)	24
2.3.2 Polietileno de alta densidad (HDPE)	24
2.3.3 Policloruro de vinilo (PVC)	25
2.3.4 Polietileno de baja densidad (LDPE).....	26
2.3.6 Poliestireno (PS)	27
2.4 Mezclas asfálticas con plástico	28
2.4.1 Antecedentes de resultados	29
2.4.2 Formas de incorporar el plástico en las mezclas asfálticas	30
2.4.3 Método seco y húmedo.....	30



2.4.4 Método de Pirolisis.....	31
III. METODOLOGÍA.....	32
3.1 Desarrollo de metodología.....	32
3.1.1 Diseño Tradicional de Mezclas Asfálticas.....	33
3.1.2 Diseño Modificado de Mezclas Asfálticas con Incorporación de Residuos Plásticos.....	33
3.1.3 Comparación de Resultados.....	34
3.2 Diseño de mezclas asfálticas.....	35
3.2.1 Selección de Agregados.....	35
3.2.2 Método Superpave	35
3.2.3 Determinación de la Granulometría Óptima	39
3.2.4 Selección del Ligante Asfáltico.....	40
3.2.5 Preparación de las Mezclas de Prueba.....	40
3.2.6 Evaluación y Ajuste de la Granulometría.....	41
3.3 Granulometría tradicional.....	41
3.3.1 Selección y Preparación de Materiales.....	41
3.3.2 Procedimiento de Tamizado.....	42
3.3.3 Análisis de la Granulometría	42
3.3.4 Ajuste de la Granulometría.....	43
3.4 Recolección de los materiales.....	44
3.4.1 Plástico HDPE	44
3.4.2 Agregado.....	44
3.4.3 Asfalto	46
3.4.4 Detalles de los Materiales Recolectados	47
3.4.5 Proceso de Recolección	47
3.5 Granulometría con remplazo de plástico.....	48
3.5.1 Selección y Preparación de Materiales.....	48
3.5.2 Procedimiento de Tamizado y Clasificación.....	48
3.5.3 Incorporación del Plástico HDPE.....	49
3.5.4 Proceso de Tamizado del Plástico HDPE.....	50
3.5.5 Comparación de Granulometría del plástico	52
3.6 Pruebas de laboratorio (Caracterización de los materiales)	52
3.6.1 Desgaste Mediante la Prueba de los Ángeles de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas (M-MMP-4-04-00/02).....	53
3.6.2 Azul de Metileno de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas (M-MMP-4-04-014/09).....	55



3.6.3 Modulo Geológico de Corte Dinámico (M-MMP-4-05-025/02).....	58
3.7 Ensayos de pruebas de laboratorio (Mezclas asfálticas)	59
3.7.1 MAC-I. Método de prueba para la preparación y compactación de especímenes de mezclas asfálticas en caliente por medio del compactador giratorio.....	60
3.7.2 MAC-II. Método de prueba para determinar la gravedad específica bruta y densidad de la mezcla asfáltica compactada (Gmb).....	64
3.7.3 MAC-III. Método de prueba para determinar la gravedad específica teórica máxima y densidad de la mezcla asfáltica (Gmm).....	67
3.7.4 Calculo de porcentaje de vacíos.....	70
3.7.5 MAC-V. Método de prueba para determinar la resistencia a la deformación permanente y daño por humedad en una mezcla asfáltica en caliente compactada mediante la Rueda Cargada de Hamburgo.....	73
 IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES	78
4.1 Entrevista a recicladoras Baja California.	78
4.2 Pruebas de laboratorio (Caracterización de los materiales).	80
4.2.1 Desgaste de los Ángeles (M-MMP-4-04-00/02).....	80
4.2.2 Azul de Metileno (M-MMP-4-04-014/09).....	82
4.2.3 Modulo Geológico de Corte Dinámico (M-MMP-4-05-025/02).....	83
4.3 Ensayos de pruebas de laboratorio (Mezclas asfálticas)	85
4.3.1 MAC-I. Preparación y compactación de mezclas asfálticas en caliente por medio del compactador giratorio.	85
4.3.2 MAC-II. Gravedad específica bruta (Gmb).	88
4.3.3 MAC-III. Gravedad específica teórica máxima (Gmm).....	91
4.3.4 Porcentaje de vacíos.....	93
4.3.5 MAC-V. Rueda Cargada de Hamburgo.	94
4.5 Comparación de los resultados	101
4.6 Propuestas para reducción de residuos plásticos en baja california.	105
 V CONCLUSIONES.....	106
5.1 Conclusiones teóricas.....	106
5.2 Conclusiones metodológicas.	106
5.3 Conclusiones de los resultados.	107
 VI. REFERENCIAS	108



ÍNDICE DE IMÁGENES.

IMAGEN 1. TEMPERATURA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	18
IMAGEN 2. TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET O PETE)	24
IMAGEN 3. POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (HDPE)	25
IMAGEN 4. POLICLORURO DE VINILO (PVC)	26
IMAGEN 5. POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (LDPE).....	26
IMAGEN 6. POLIPROPILENO (PP)	27
IMAGEN 7. POLIESTIRENO (PS)	28
IMAGEN 8. PROCESO DE PIROLISIS	31
IMAGEN 9. DIAGRAMA DE METODOLOGÍA.....	32
IMAGEN 10. UNIVERSAL RECYCLING MEXICALI.....	44
IMAGEN 11. ASFALTOS TÉCNICOS DE LA BAJA S.A DE C.V.	45
IMAGEN 12. CARBONATO DE CALCIO.	46
IMAGEN 13. ASFALTOS TÉCNICOS DE LA BAJA S.A DE C.V.	46
IMAGEN 14. MALLAS DE CRIBADO.....	49
IMAGEN 15. PLÁSTICO HDPE TRITURADO.....	50
IMAGEN 16. TAMIZADO HDPE.....	51
IMAGEN 17. RETENIDOS HDPE.....	51
IMAGEN 18. MÁQUINA DE ABRASIÓN DE LOS ÁNGELES.....	54
IMAGEN 19. MUESTRA DE AGREGADO PARA ABRASIÓN LOS ÁNGELES	54
IMAGEN 20. EQUIPO DE AGITACIÓN PARA PRUEBA DE AZUL DE METILENO.....	56
IMAGEN 21. FORMACIÓN DEL HALO COLOR AZUL ALREDEDOR DE LA GOTA.	57
IMAGEN 22. MUESTRA DURANTE LA PRUEBA DE AZUL DE METILENO.	57
IMAGEN 23. REÓMETRO DE CORTE DINÁMICO.....	59
IMAGEN 24. PREPARACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA.	61
IMAGEN 25. COMPACTADOR GIRATORIO.....	62
IMAGEN 26. MEZCLA ASFÁLTICA CON HDPE COMPACTADA ADECUADAMENTE.....	63
IMAGEN 27. MEZCLA ASFÁLTICA CON 5% Y 4% DE HDPE.....	63
IMAGEN 28. BANCO PARA MASA SUMERGIDA.....	66
IMAGEN 29. MEZCLA ASFÁLTICA SUMERGIDA	67
IMAGEN 30. MEZCLA ASFÁLTICA SIN COMPACTAR.....	68
IMAGEN 31. PICNÓMETRO	69
IMAGEN 32. VACÍOS EN PASTILLAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.	72
IMAGEN 33. DIMENSIONES DE MOLDES PLÁSTICOS	75
IMAGEN 34. MOLDES PARA RUEDA DE HAMBURGO	75
IMAGEN 35. EQUIPO DE LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO	77
IMAGEN 36. DELIMITACIÓN DE LOS BARRIOS DE MEXICALI, BAJA CALIFORNIA.....	78
IMAGEN 37. RESULTADO DE PRUEBA DE DESGASTE DE LOS ÁNGELES.	81
IMAGEN 38. RESULTADO DE PRUEBA DE AZUL DE METILENO.	82
IMAGEN 39. RESULTADO DEL MÓDULO GEOLÓGICO DE CORTE DINÁMICO.....	84
IMAGEN 40. MEZCLAS ASFÁLTICAS SIN COMPACTAR.....	87
IMAGEN 41. MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADA ADECUADAMENTE.....	87
IMAGEN 42. MONTAJE DE RUEDA DE HAMBURGO	96
IMAGEN 43. FUNCIONAMIENTO DE RUEDA DE HAMBURGO.....	97
IMAGEN 44. PASTILLAS ANTES DE DEFORMACIÓN.....	97
IMAGEN 45. PASTILLAS DESPUÉS DE DEFORMACIÓN.....	98
IMAGEN 46. GRÁFICO DE RESULTADO DE MEZCLA ASFÁLTICA SIN PLÁSTICO CON NIVEL DE CONFIANZA.	98
IMAGEN 47. GRÁFICO DE RESULTADO DE MEZCLA ASFÁLTICA 0.62% HDPE CON NIVEL DE CONFIANZA.	99
IMAGEN 48. COMPARATIVA DE GRAFICAS DE RESULTADOS DE RUEDAS DE HAMBURGO.	99



ÍNDICE DE TABLAS.

TABLA 1. EVOLUCIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS Y LAS CARRETERAS	15
TABLA 2. CLASIFICACIÓN DEL ASFALTO	17
TABLA 3. EVOLUCIÓN DEL PLÁSTICO	20
TABLA 4. TIPOS DE PLÁSTICOS SEGÚN SUS PROPIEDADES Y APLICACIONES.	23
TABLA 5. COMPARACIÓN ENTRE MÉTODOS DE CREACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.	37
TABLA 6. RESULTADOS DEL TAMIZADO.	42
TABLA 7. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL PLÁSTICO HDPE	50
TABLA 8. GRANULOMETRÍA HDPE	52
TABLA 9. COMPOSICIÓN DE LA MUESTRA DE PRUEBA Y CARGAS ABRASIVAS.....	54
TABLA 10. DATOS DE MATERIALES.	57
TABLA 11. RESULTADOS DE ENTREVISTAS DE RECICLADORAS.	79
TABLA 12. GRANULOMETRÍA MEZCLA ASFÁLTICA SIN PLÁSTICO.....	86
TABLA 13. GRANULOMETRÍA MEZCLA ASFÁLTICA CON PORCENTAJES DE HDPE.....	86
TABLA 14. TABLA DE RESULTADOS DE COMPACTACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	88
TABLA 15. RESULTADOS GMB, ABSORCIÓN DE AGUA.	90
TABLA 16. RESULTADOS DE GMM.....	91
TABLA 17. REGISTRO DE RESULTADOS DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO.	96
TABLA 18. COMPARACIÓN DE RESULTADOS.	102



RESUMEN.

Esta investigación se enfocó en la evaluación de la viabilidad de utilizar residuos plásticos de HDPE en el diseño de mezclas asfálticas mediante un proceso de mezclas calientes, con el objetivo de buscar mejorar la resistencia a la deformación permanente en los pavimentos, abordando al mismo tiempo problemas en la calidad de los agregados en Baja California y la contaminación generada por residuos plásticos. Para ello, se prepararon y probaron distintos tipos de mezclas asfálticas con diferentes porcentajes de HDPE triturado del 0.5%, 0.62%, 1%, 4% y 5% y se compararon con una mezcla tradicional elaborada siguiendo el proceso del método Superpave, para la creación de pavimentos sin la incorporación de plásticos. Las pruebas de laboratorio incluyeron el ensayo de la rueda de Hamburgo, análisis de la compactación, evaluación de la absorción de agua y contenido de vacíos.

Los resultados obtenidos mostraron que las mezclas con altos porcentajes de HDPE tales como el 4% y 5% no se compactaron adecuadamente y presentaron problemas de rebote, lo que indica una mala densificación de los materiales, impidiendo determinar la deformación máxima. Las mezclas con 0.5% y 0.62% de HDPE mostraron una mejora en la estabilidad y reducción de vacíos, pero no lograron superar significativamente las propiedades de las mezclas tradicionales sin plástico. En particular, se observó un efecto importante de rebote en las mezclas con HDPE que dificultó la determinación precisa de la resistencia a la deformación permanente, un factor crucial en la para la comparativa de resultados.

Se planteó el uso de residuos plástico, usados como sustituto parcial del agregado, con el fin de mejorar la resistencia de las mezclas asfálticas a lo que no se esperaba que se derritiera el material plástico ya que se utilizó un plástico con un alto punto de función; sin embargo, las pruebas demostraron que el HDPE se derrite de manera inconsistente en ciertas partes de las mezclas mientras que otras no, lo que provoca es una falta de cohesión en la mezcla y afecta negativamente su rendimiento. Por lo que la hipótesis nula, que menciona la imposibilidad de utilizar residuos plásticos de HDPE para mejorar la resistencia a la deformación permanente, queda aceptada. En consecuencia, a estos resultados, se concluyó que el HDPE usado como fracciones de agregado para mejorar las mezclas asfálticas no es una opción viable si se usa en la región de Baja California.



I. MARCO INTRODUCTORIO

1.1 Introducción

Las mezclas asfálticas son aquellos materiales que pueden desempeñar un papel crucial en la creación y desarrollo de caminos viales, compuestas agregados pétreos (como grava, arena y roca triturada) y asfalto (material bituminoso derivado del petróleo) trabajadas a temperaturas de 120-180°C constituidas como mezclas asfálticas calientes, siendo fundamentales en el diseño y la construcción de carreteras, autopistas, calles urbanas o pistas de aeropuertos.

Su versatilidad se manifiesta en su capacidad para adaptarse a distintos requerimientos en el tráfico y cargas, proporcionando soluciones de pavimentación que se ajustan a las necesidades específicas de cada proyecto ([Garnica Anguas et al., 2004](#)). El diseño y creación de estas mezclas no solo ofrecen una superficie lisa y segura para la circulación vehicular, sino que también contribuyen a la reducción del ruido del tráfico y mejoran la experiencia de conducción para los usuarios.

La durabilidad de las mezclas asfálticas es una de las características destacadas más importantes, ya que están diseñadas para resistir el desgaste que puede llegar a ser causado por el tráfico constante, las condiciones climáticas extremas y los agentes químicos presentes en el ambiente. Este tipo de resistencia al agua y a los daños ambientales pueden llegar a asegurar una vida útil prolongada de las superficies pavimentadas, minimizando la necesidad de mantenimiento y reparaciones frecuentes ([IMT, 2005](#)).

Por otro lado, la demanda de mezclas asfálticas ha tenido un aumento significativo en la actualidad, esto debido a la expansión de la infraestructura vial en todo el mundo y la creciente necesidad de rehabilitar y mejorar las redes viales existentes ([ASEFMA, 2022](#)). La eficiencia, la rapidez de instalación, la relación entre el costo y beneficio son favorables en las mezclas asfálticas lo que las convierten en las opciones preferidas para numerosos proyectos de construcción y rehabilitación de carreteras.

En base a los desafíos medioambientales y las necesidades de innovación en el sector de la construcción de carreteras viales, se ha observado una creciente tendencia hacia la incorporación de residuos plásticos en las mezclas asfálticas ([Ismail & Al-Hashmi, 2008](#); [Assefa, 2021](#);



[Sukmawan & Arifin, 2021](#)). Esta práctica innovadora busca el aprovechamiento de los beneficios mecánicos y sostenibles que los plásticos pueden llegar a brindar en las mezclas asfálticas, ofreciendo soluciones que mejoran la resistencia, durabilidad y rendimiento de los pavimentos. El uso de plásticos reciclados como aditivos o sustitutos parciales de materiales tradicionales en las mezclas asfálticas además llega a contribuir en la gestión de residuos, además de que también abre nuevas posibilidades para el desarrollo de pavimentos más resistentes y beneficiosos para el ambiente.

1.2 Descripción de problemática

En la actualidad la calidad de los agregados es un factor determinante en la eficiencia que pueden presentar las mezclas asfálticas, ya que este material representa entre el 90% y el 96% del peso de la mezcla y entre el 82% y el 88% del volumen total de la mezcla ([Martínez Lazcano, 2016](#)). En Baja California, se ha llegado a identificar una deficiencia en la calidad y resistencia de los agregados que son utilizados en la región, esta situación se agrava con el hecho de que los agregados de los bancos de materiales en el municipio de Mexicali superan los índices máximos permitidos en pruebas que miden sus estado y resistencia como lo es la prueba del desgaste de los ángeles de la Norma N-CMT-4-04/17 de la Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transportes, esto pudiendo llegando a afectar en la calidad y durabilidad de las mezclas asfálticas.

Aunado a esto existe otra problemática por la contaminación por residuos plásticos la cual representa un grave problema ambiental a tanto a nivel regional como a un nivel global, afectando en los ecosistemas terrestres y marinos, además de la vida silvestre y la salud humana. Con lo que, a pesar de los esfuerzos de reciclaje y gestión de residuos, aún existe una gran cantidad de plásticos que sigue acumulándose en el medio ambiente, generando impactos negativos duraderos y difíciles de revertir. Estudios demuestran que la cantidad de plástico utilizado aumenta constantemente durante los últimos 30 años, alcanzando más de 30 millones de toneladas para 2017 y este crecimiento puede duplicarse para el año de 2050 ([d'Ambrières, 2019](#)).

Ante esta problemática, surge la necesidad de buscar soluciones innovadoras que aborden tanto



la deficiencia de los agregados como la creciente contaminación por desechos plásticos. La necesidad de encontrar soluciones efectivas para reducir, reutilizar y reciclar los residuos plásticos es urgente para mitigar los efectos devastadores de esta contaminación en nuestro planeta.

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 General

Evaluar y obtener un diseño de mezclas asfálticas sustentables por el método caliente con materiales plásticos, que pueda brindar resistencia faltante a las vialidades y a su vez pueda generar un cambio positivo en el ambiente.

1.3.2 Específicos

- Aumentar la resistencia de mezclas asfálticas.
- Brindar propuestas para reducir los residuos plásticos de la región.
- Encontrar un método de incorporación de plástico en mezclas asfálticas.
- Determinar un porcentaje de sustitución de plástico HDPE que pueda llegar a ser óptimo para las mezclas asfálticas calientes.

1.4 Hipótesis

Es posible utilizar residuos plásticos de HDPE en el diseño de mezclas asfálticas incorporándolos mediante un proceso de mezclas calientes, haciendo que este trabaje como escamas u agregado para mejorar la resistencia a la deformación permanente.

1.5 Hipótesis nula

No es posible utilizar los residuos plásticos de HDPE en el diseño de mezclas asfálticas incorporándolos mediante un proceso de mezclas calientes, haciendo que este trabaje como escamas u agregado para mejorar la resistencia a la deformación permanente.



1.6 Justificación de investigación

Según datos de la Organización de las Naciones Unidas, se estima que se generan aproximadamente 460 millones de toneladas de residuos plásticos a nivel global cada año. De esta gran cantidad de residuos solo el 9% de este plástico es reciclado, el 12% se incinera y el restante 79% se acumula en vertederos o llegando a contaminar el medio ambiente. Esto representa una oportunidad importante para innovar en el manejo y la reutilización de los residuos plásticos, buscando reducir su impacto ambiental y tratando de maximizar el aprovechamiento de este residuo.

En este contexto, la presente investigación se centra en el desarrollo de un diseño de mezclas asfálticas calientes que pueda llegar a incorporar los residuos plásticos como una estrategia innovadora para mejorar la calidad de los pavimentos y contribuir en la reducción de la contaminación por plásticos en baja california. Al integrar residuos plásticos en la mezcla asfáltica, se busca tratar de compensar las deficiencias presentadas en los agregados tradicionales y aprovechar las propiedades beneficiosas de los plásticos reciclados.

Esta investigación tiene como su objetivo principal promover prácticas más sostenibles en los diseños y construcciones de infraestructuras viales, ofreciendo soluciones que puedan ser eficientes en términos de desempeño vial, así como amigables con el medio ambiente. Se espera que los resultados obtenidos puedan contribuir con el desarrollo de tecnologías más sustentables en el sector carretero y fomenten la adopción de prácticas responsables que beneficien en la sociedad y el planeta.



II. MARCO TEÓRICO

2.1 Mezclas Asfálticas

Según la Secretaria de Infraestructuras, Comunicaciones y Transportes (SICT) las mezclas asfálticas se definen como una combinación cuidadosamente diseñada de agregados minerales, unidos mediante un ligante asfáltico, con el objetivo de crear una estructura resistente y duradera para pavimentos ([IMT, 2005](#)).

En este proceso, los agregados pétreos son recubiertos de forma uniforme por el asfalto, garantizando así la cohesión y estabilidad de las mezclas. Este tipo de combinación de materiales puede permitir la creación de superficies de rodadura que son capaces de soportar cargas del tráfico vehicular, así mismo también resistir las condiciones climáticas adversas y proporcionar una superficie segura y cómoda para los usuarios de las vías ([Alarcón, Chaparro y Sánchez, 2020](#)). La selección adecuada de los materiales y la proporción óptima entre ellos son fundamentales para obtener mezclas asfálticas con las propiedades mecánicas y de desempeño deseadas.

2.1.1 Historia

Las mezclas asfálticas han desempeñado roles para la fabricación de carreteras de forma crucial en el desarrollo y la conectividad de ciudades y entornos a lo largo de la historia. La creación de vialidades usando materiales asfálticos para crear pavimentos en caminos se remonta a la antigüedad, con evidencias de su aplicación en civilizaciones como los babilonios y los romanos ([Tania et al., 2016](#)). Sin embargo, fue en el trascurso del siglo XIX cuando el asfalto comenzó a emplearse de manera más constante en la construcción de carreteras, especialmente en los países como Europa y Estados Unidos.

A medida que transcurrió el siglo XX y con la industria del automovilismo desarrollándose, la demanda de carreteras más resistentes y duraderas se incrementó, impulsando la investigación y el desarrollo de tecnologías de pavimentación con asfalto. Entrando en las décadas de 1910 y 1920, se establecieron las primeras especificaciones y normativas para la creación de pavimentos con mezclas asfálticas, creando las bases para la estandarización de los materiales y métodos de construcción ([Sanz García, 2022](#)).

Con los avances tecnológicos en gigantes y aditivos durante las futuras décadas de 1930 y 1940, las propiedades y la durabilidad de las mezclas asfálticas empezaron a mejorar significativamente,



permitiendo la construcción de carreteras más resistentes en base a condiciones climáticas y al tráfico vehicular de las comunidades. Durante los años proximos, se desarrollaron técnicas avanzadas referentes al diseño y control de calidad, impulsando la calidad y el rendimiento de los pavimentos asfálticos.

En las décadas de 1970 y 1980, con el creciente interés en la sostenibilidad ambiental, surgieron prácticas de reciclado de asfalto y enfoques más ecológicos en la construcción de carreteras. Estas innovaciones marcaban una transición hacia métodos de construcción más sostenibles y eco-amigables, al tiempo que mantenían o mejoraban la calidad y la durabilidad de las carreteras (Fernanda et al., 2010; Garcia, 2022).

Llegando al siglo XXI, con la continua evolución de la tecnología y la creciente conciencia ambiental, se han desarrollado mezclas asfálticas de alto rendimiento ofreciendo un incremento en la durabilidad, resistencia y vida útil. Además, se ha puesto un énfasis creciente en el diseño y la construcción de carreteras continuas y adaptativas, capaces de soportar los desafíos cambiantes del clima y el tráfico vehicular, al tiempo que se minimiza su impacto ambiental.

En la **Tabla 1**, se muestra la evolución durante los años de las mezclas asfálticas y las carreteras en la historia.

Tabla 1. Evolución de las Mezclas Asfálticas y las Carreteras

AÑOS	SUCESOS
Siglo XIX	Primeros registros de uso de asfalto en la construcción de carreteras en el Reino Unido y otras partes de Europa.
1900	Auge de la industria automovilística y aumento en la demanda de carreteras duraderas y resistentes.
1910 - 1920	Introducción de las primeras especificaciones y normativas para las mezclas asfálticas.
1930 - 1940	Avances tecnológicos en ligantes y aditivos mejoran las propiedades y durabilidad de las mezclas asfálticas.
1950 – 1960	Desarrollo de técnicas avanzadas de diseño y control de calidad para los pavimentos asfálticos.
1970 - 1980	Auge del reciclado de asfalto y la adopción de prácticas más sostenibles en la construcción de carreteras.
2000 -Actualidad	Innovaciones en materiales y tecnologías conducen a la creación de mezclas asfálticas de alto rendimiento y enfoques más sostenibles en la construcción de carreteras.

Fuente: Elaboración propia en base a (Tania Rojo & Moquete, 2016).

2.1.2 Agregados minerales

Los agregados minerales son los materiales granulares inertes que se utilizan comúnmente en la construcción de mezclas asfálticas y hormigones. Pueden ser materiales esenciales para brindar



resistencia, estabilidad y durabilidad a las estructuras viales y edificaciones. Pudiendo ser de origen natural o artificial, clasificándose en dos categorías principales: agregados finos y agregados gruesos ([SICT, 2009](#); [Carolina, 2016](#)).

Los agregados finos son aquellos que consisten principalmente en partículas de tamaños diminutos como arena, que suelen tener un diámetro máximo de 4.75 mm. Estos agregados son generalmente arena natural o pueden ser arena de trituración y son responsables de llenar los espacios vacíos entre los agregados gruesos, contribuyendo a la cohesión natural de la mezcla asfáltica misma.

Por otro lado, los agregados gruesos son aquellos que comprenden partículas de tamaño grava, con diámetros superiores que varía desde 4.75 mm hasta aproximadamente 38.1 mm. Estos agregados son usualmente grava natural o grava triturada, que proporcionan resistencia estructural a la mezcla asfáltica, mejorando su capacidad de soportar cargas y esfuerzos externos.

En conjunto, los agregados minerales constituyen aproximadamente el 90 al 96% del peso de las mezclas asfálticas y entre el 82 al 88% de su volumen total, dependiendo de la granulometría y las proporciones utilizadas en el diseño de la mezcla. La selección y calidad de estos materiales son factores críticos que influyen directamente en las propiedades y el desempeño de las mezclas asfálticas como tal, por lo que es fundamental asegurar su conformidad con las especificaciones y normativas aplicables ([Asociación Mexicana del Asfalto, 2011](#)).

2.1.3 Asfaltos

El asfalto, también conocido como betún, es un componente esencial en las mezclas asfálticas debido a su función como ligante que une los agregados minerales. Este material es un compuesto termoplástico, bituminoso y viscoso de color oscuro, compuesto principalmente por hidrocarburos derivados de la destilación del petróleo crudo. Su principal función es recubrir los agregados minerales para facilitar la adhesión y cohesión entre ellos ([SICT, 2005](#)). Al calentarse, el asfalto se vuelve gradualmente más blando hasta alcanzar una consistencia líquida y viscosa. Dependiendo de su aplicación, el asfalto puede clasificarse en diferentes tipos, como cementos asfálticos (AC), emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados ([Hong et al., 2022](#)).

Es crucial entender las diferentes clasificaciones del asfalto, ya que estas determinan sus propiedades y aplicaciones específicas. Una de las clasificaciones más comunes se basa en el grado de penetración (PEN), que mide la suavidad o dureza del asfalto a una temperatura estándar de



25°C. Cuanto mayor sea el valor de penetración, más suave será el asfalto. Otra clasificación importante es el grado de desempeño (PG), que se enfoca en el comportamiento del asfalto bajo diferentes condiciones climáticas y de tráfico. La designación PG incluye dos números, como PG 64-22, donde el primer número indica la temperatura mínima a la cual el asfalto mantiene sus propiedades viscoelásticas, y el segundo número indica la temperatura máxima (D'Angelo, J., Bukowski, J., & Harman, 1999).

La Tabla 2 muestra las clasificaciones del asfalto según el grado de desempeño (PG) y el grado de penetración (PEN), proporcionando un marco de referencia para seleccionar el tipo adecuado de asfalto según las necesidades específicas de cada proyecto.

Tabla 2. Clasificación del asfalto

PG	MAXIMUM PERFORMANCE GRADE TEMPERATURE						
	46 °C	52°C	58°C	64°C	70°C	76°C	76°+N6°
	MINIMUM PERFORMANCE GRADE TEMPERATURE						
PEN	+2°C	- 4°C	- 10°C	- 16°C	- 22°C	- 28°C	- 28°-N6°
	PENETRATION RANGES						
	40-50°C		60-70°C		80-100°C		120-150°C

Fuente: Elaboración propia en base a (SICT, 2005).

2.1.4 Tipos de mezclas asfálticas y aplicaciones

Las mezclas asfálticas se clasifican principalmente según la temperatura de mezclado:

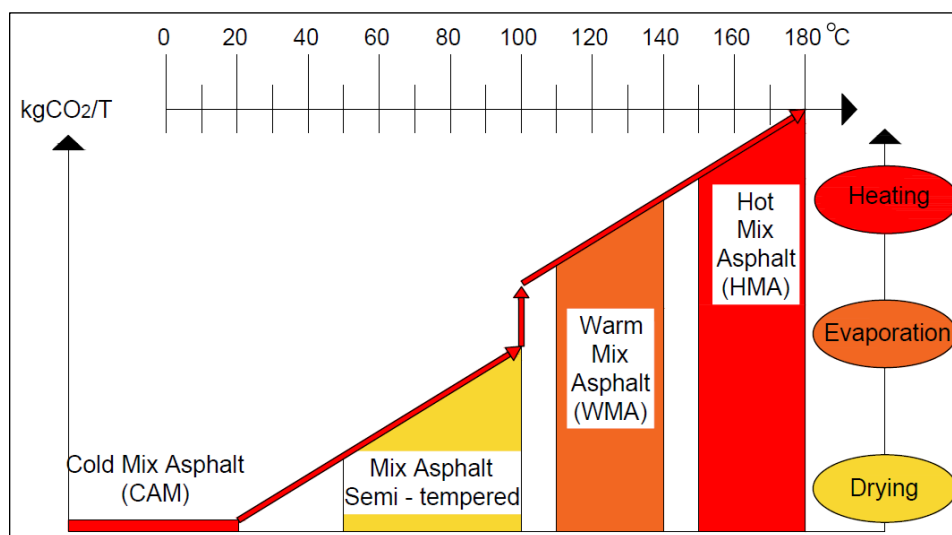
- Mezclas asfálticas en caliente o como son comúnmente conocidas en inglés; Hot Mix Asphalt (HMA): Las mezclas HMA son producidas a temperaturas elevadas, generalmente entre 150-180°C. Este método tradicional de producción de mezclas asfálticas, aunque ampliamente utilizado, presenta un alto consumo energético y emite gases contaminantes durante su producción.
- Mezclas asfálticas frías o como son comúnmente conocidas en inglés; Cold Asphalt Mixes (CMA): Las mezclas CMA se caracterizan por su aplicación a temperaturas más bajas, oscilando entre 20°C y 140°C. Este tipo de mezcla es frecuentemente utilizado en trabajos de bacheo debido a su facilidad de aplicación a temperatura ambiente.
- Mezclas asfálticas templadas o como son comúnmente conocidas en inglés; Warm Asphalt Mixes (WMA): Las mezclas WMA son un avance más reciente en la tecnología de mezclas



asfálticas. Se producen y aplican a temperaturas intermedias, lo que resulta en un menor consumo energético y una reducción en las emisiones de gases contaminantes en comparación con las HMA.

La selección del tipo de mezcla asfáltica a utilizar dependerá de las especificaciones del proyecto, las condiciones climáticas y las necesidades específicas de la obra. A medida que la industria continúa investigando y desarrollando nuevas tecnologías, se espera que las mezclas WMA ganen mayor relevancia debido a sus beneficios ambientales y económicos (López, C., Thenoux, G., Sandoval, G., Armijos, V., Ramírez, A., Guisado, F., & Moreno, 2017; Raza, S. A., Shah, N., & Sharif, 2019).

Imagen 1. Temperatura de Mezclas asfálticas



Fuente: Elaboración propia en base a (Porot, 2008).

2.1.5 Diseños de mezclas asfálticas

El diseño de mezclas asfálticas es un proceso esencial que determina las propiedades y el comportamiento de los pavimentos. Dos de los métodos más utilizados para el diseño de mezclas asfálticas son el método Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements) y el método Marshall (Garnica Anguas et al., 2005).

- **Método Superpave:** El método Superpave es un enfoque moderno y avanzado que utiliza técnicas de diseño basadas en el rendimiento y en el comportamiento de los materiales



asfálticos. Este método incorpora el uso de modelos predictivos para prever el desempeño de la mezcla bajo diversas condiciones de carga y clima. Una de las ventajas clave del método Superpave es su flexibilidad para la incorporación de materiales reciclados o modificados, como el caucho o el plástico, permitiendo adaptar las mezclas asfálticas para mejorar su durabilidad y resistencia (McGennis et al., 1996).

- **Método Marshall:** El método Marshall es un enfoque tradicional y ampliamente utilizado que se centra en la estabilidad y resistencia de la mezcla asfáltica. Este método implica la compactación de una muestra de mezcla asfáltica a una temperatura específica para determinar su estabilidad y flujo. Aunque el método Marshall sigue siendo relevante, el método Superpave ha ganado popularidad debido a su capacidad para prever el comportamiento a largo plazo de las mezclas asfálticas y su adaptabilidad a la incorporación de materiales reciclados y modificados (Minaya S., 2001).

La incorporación de materiales reciclados o modificados, como el caucho o el plástico, en las mezclas asfálticas puede ofrecer beneficios significativos en términos de sostenibilidad, durabilidad y rendimiento. El método Superpave, con su enfoque basado en el rendimiento, proporciona un marco adecuado para evaluar y aprovechar las ventajas de estos materiales modificadores, abriendo nuevas oportunidades para el desarrollo de mezclas asfálticas más resistentes y sostenibles.

2.2 Plástico

El plástico es un material polimérico sintético o semisintético que se caracteriza por su flexibilidad, durabilidad y versatilidad en aplicaciones industriales y cotidianas. Derivado principalmente de recursos petroquímicos, el plástico ha revolucionado numerosos sectores debido a sus propiedades únicas, como su capacidad para ser moldeado en una amplia variedad de formas y resistir la corrosión y degradación (Perdomo, 2002). Sin embargo, a pesar de sus beneficios funcionales, el plástico presenta desafíos significativos en términos de gestión de residuos e impacto ambiental. Su persistencia en el medio ambiente, junto con su creciente producción y consumo, ha generado preocupaciones globales sobre la contaminación y la sostenibilidad (PLASTIVIDA, 2007). La búsqueda de soluciones innovadoras para reutilizar y reciclar el plástico ha llevado a la exploración de nuevas aplicaciones, como su incorporación en mezclas asfálticas, con el objetivo de mejorar las propiedades y la durabilidad de los materiales de construcción.



2.2.1 Historia

El plástico ha desempeñado un papel fundamental en la evolución industrial y tecnológica de la humanidad desde su invención a principios del siglo XX. La historia del plástico comenzó con la búsqueda de alternativas a los materiales naturales, impulsada por la demanda de productos más duraderos y versátiles ([Plastics Europe., 2023](#)). La primera producción comercial de plásticos se remonta a la década de 1920, marcando el inicio de una era de innovación y desarrollo en la industria química y manufacturera. Sin embargo, con el paso del tiempo, el uso generalizado y la gestión inadecuada de los desechos plásticos han generado preocupaciones ambientales globales, dando lugar a la necesidad de abordar los desafíos asociados con la producción, el consumo y la disposición de los plásticos ([Naeco., 2022](#)).

Tabla 3. Evolución del plástico

AÑOS	SUCESOS
1907	Leo Baekeland inventa la baquelita, el primer plástico totalmente sintético, marcando el comienzo de la era de los plásticos modernos.
1920	Se inicia la producción comercial de plásticos, con el desarrollo de materiales como el PVC (policloruro de vinilo) y el poliestireno.
1930	El polietileno, uno de los plásticos más utilizados en la actualidad, es descubierto y comercializado.
1940	Durante la Segunda Guerra Mundial, la producción de plásticos experimenta un auge debido a la demanda de materiales ligeros y resistentes para aplicaciones militares.
1950	Se introduce el polipropileno, ampliando aún más la gama de plásticos disponibles y su aplicabilidad en diversas industrias.
1960	Se desarrollan plásticos como el PET (tereftalato de polietileno), utilizado ampliamente en envases y botellas.
1970	Surge la conciencia ambiental y se inician los primeros esfuerzos para promover el reciclaje y la gestión sostenible de los plásticos.
1980	Se introduce el PLA (ácido poliláctico), un plástico biodegradable derivado de fuentes renovables.
1990	La producción de plásticos continúa creciendo, pero también aumentan las preocupaciones sobre la contaminación y los desechos plásticos en los océanos.
2000	Se intensifican los esfuerzos globales para reducir el uso de plásticos de un solo uso y promover soluciones sostenibles, como la bioplástica y el plástico reciclado.
2010	La crisis global de los residuos plásticos impulsa iniciativas globales para abordar la contaminación plástica y fomentar la economía circular.

Fuente: Elaboración propia en base a ([Chalmin, 2019](#)).

La **Tabla 3**, ofrece una cronología clave del desarrollo de los plásticos desde la invención de la baquelita en 1907 hasta las iniciativas actuales para abordar la crisis de los residuos plásticos. Destaca hitos como la producción comercial inicial de PVC y poliestireno en la década de 1920,



el descubrimiento del polietileno en la década de 1930, y la introducción de plásticos icónicos como el PET en la década de 1960. La Segunda Guerra Mundial impulsó la demanda de plásticos, mientras que las décadas de 1970 y 1980 marcaron un cambio hacia la conciencia ambiental con la introducción de plásticos biodegradables ([Chalmin, 2019](#)). A pesar del crecimiento continuo en la producción de plásticos, las preocupaciones ambientales han llevado a esfuerzos globales para promover el reciclaje y soluciones sostenibles desde la década de 1990 hasta la actualidad ([Leal F et al., 2019](#)).

2.2.2 Reciclaje

El reciclaje de plásticos se ha convertido en una estrategia crucial para mitigar los impactos ambientales asociados con la producción y el desecho de estos materiales. A medida que la conciencia sobre la contaminación plástica y su huella ambiental ha crecido, el reciclaje se ha posicionado como una solución efectiva para reducir la cantidad de plásticos que terminan en vertederos y océanos ([Perdomo, 2002](#)).

El proceso de reciclaje de plásticos implica la recolección, clasificación, procesamiento y transformación de residuos plásticos en nuevos productos. Inicia con la recolección selectiva de plásticos descartados, seguido de su clasificación según el tipo de resina para garantizar una gestión adecuada. Posteriormente, los plásticos clasificados son procesados y transformados en gránulos o pellets, que pueden ser utilizados como materia prima para la fabricación de nuevos productos plásticos.

Es importante destacar que el reciclaje de plásticos contribuye a la reducción del consumo de recursos naturales, la disminución de la contaminación ambiental y la promoción de una economía circular más sostenible ([Marquez, K. P. et al., 2021](#)). Al dar una segunda vida a los plásticos a través del reciclaje, se minimiza la necesidad de producción de nuevos plásticos, reduciendo así el consumo de energía y la emisión de gases de efecto invernadero asociados con su fabricación.

Sin embargo, a pesar de los beneficios del reciclaje, existen desafíos significativos que deben ser abordados, como la falta de infraestructura adecuada de reciclaje, la contaminación de los plásticos reciclados y la necesidad de aumentar la conciencia y la participación pública en el reciclaje. Es fundamental implementar políticas y estrategias efectivas de reciclaje, así como fomentar la innovación en tecnologías de reciclaje para superar estos desafíos y avanzar hacia una gestión más sostenible de los plásticos.



2.3 Tipos de plásticos

El plástico, como material de uso cotidiano fabricado en gran parte del planeta, ha generado una significativa cantidad de residuos que impactan negativamente en los ecosistemas. Según la United Nations Development Program (UNDP), se estima que en 2021 el mundo generó 139 millones de toneladas métricas de residuos plásticos de un solo uso (UNDP, 2023). Este crecimiento continuo en el uso del plástico se refleja en estudios que indican que la cantidad de plástico utilizado aumenta constantemente, alcanzando más de 30 millones de toneladas para 2017, y se proyecta que este crecimiento pueda duplicarse para el año 2050 (d'Ambrières, 2019). Además, se destaca que más del 90% del plástico producido proviene de combustibles fósiles, lo que puede tener consecuencias medioambientales negativas, como la emisión de gases de efecto invernadero y otros contaminantes (d'Ambrières, 2019; Leal Filho, W. et al., 2019).

La baja tasa de reciclaje del plástico, especialmente en países como Estados Unidos, es un desafío importante. Mientras que Estados Unidos tiene una tasa de reciclaje de plástico baja en comparación con otros países, como Japón, que alcanza un 78% (Khoo, 2019). La acumulación de desechos plásticos se ha convertido en un problema global con implicaciones en diversas industrias, el turismo, la vida marina, la salud humana y la sostenibilidad general (Napper, I. E., & Thompson, 2020).

En respuesta a esta problemática, se están buscando nuevas formas de reducir la contaminación causada por los residuos plásticos. Aunque la prohibición total del plástico podría parecer una alternativa rápida, su implementación sería compleja y difícil de llevar a cabo (Walker, T. R., & Xanthos, 2018). Por lo tanto, es crucial explorar estrategias más viables y sostenibles para abordar este problema, como el reciclaje y la reutilización de plásticos.

La producción y utilización de plásticos han transformado significativamente la industria moderna, proporcionando soluciones versátiles y duraderas para una amplia gama de aplicaciones. Sin embargo, el aumento constante en la producción de plásticos ha generado preocupaciones sobre su impacto ambiental y la gestión adecuada de sus residuos.



Tabla 4. Tipos de plásticos según sus propiedades y aplicaciones.

PLASTICO	SYMBOLO	PRINCIPALES PRODUCTOS	PROPIEDADES FÍSICAS PRINCIPALES
Poliétileno tereftalato (PET o PETE)		Botellas de bebidas, botellas/jarras de alimentos (aderezos, mantequilla de maní, miel, etc.), y ropa o cuerda de poliéster.	• Excelentes propiedades mecánicas (resistente al desgaste y dobleces). • Muy buena barrera al CO₂ y aceptable al oxígeno y humedad. • Alta resistencia química y no deformabilidad térmica. • Transparente y cristalino, y acepta algunos colorantes. • Densidad: 1.15 ± 0.03 g/cm³, resistencia a la tracción: 0.8 ± 0.14 N/mm² (Biber, N. F., Foggo, A., & Thompson, 2019).
Poliétileno de alta densidad (HDPE)		Cartones de leche, botellas de detergente, revestimientos de cajas de cereales, juguetes, cubos, bancos de parque y tubos rígidos.	• Resistencia a la tracción de 0,20 - 0,40 N/mm². • Una densidad de 0,944 - 0,965 g/cm³. • Su coeficiente de expansión térmica varía entre 100 y 220×10^{-6}. • Su temperatura máxima para uso continuo es de 65°C (Rojas, 2023). • Punto de fusión = 131 °C, índice de flujo de fusión = 6,12 g/10 min (Casey, D., McNally, C., Gibney, A., & Gilchrist, 2008).
Polivinilo cloruro (PVC)		Tuberías de plomería, tarjetas de crédito, juguetes para humanos y mascotas, canalones de lluvia, mordedores, bolsas de fluido IV, tubos médicos y mascarillas de oxígeno.	• Densidad = 0,77 a 0,88 g/cm³ (Singh, B., Gupta, M., & Tarannum, 2003). • Relativamente resistente a la luz solar y a la intemperie, el PVC provocará granulación después de muchos años. • Punto de fusión 212 - 310°C. • Proviene del petróleo crudo (43%) y de la sal (57%).
Poliétileno de baja densidad (LDPE)		Plástico envoltura/adherente, bolsas de sándwich y pan, burbujas de aire, bolsas de basura, bolsas de compras y vasos desechables	• Densidad PEAD: 0,93 a 0,97 g/cm³. • Moderada resistencia a aceites y grasas. • Temperatura continua: -50°C a +60°C, material relativamente rígido con capacidades de temperatura útiles (Sintac., 2022). • Punto de reblandecimiento = 85 °C, resistencia a la tracción = 8,96 MPa (Zhang, F., & Hu, 2016). • Velocidad de fusión de 0,8 g/min a 190 °C (Yan, K., Xu, H., & You, 2015).
Polipropileno (PP)		Pajillas, tapas de botellas, botellas de medicamentos, recipientes para alimentos calientes, cinta adhesiva y estuches de DVD/CD	• El polipropileno es altamente neutro a ácidos, bases y disolventes. • Baja permeabilidad al vapor de agua. • Inodoro y relativamente fácil de procesar. • Se degrada a temperaturas superiores a 270°C. • Densidad = 0,9 g/cm³, índice de fusión = 12 g/min. (Jmal, H., Bahlouli, N., Wagner-Kocher, C., Leray, D., Ruch, F., Munsch, J. N., & Nardin, 2018).
Poliestireno (PS)		Vasos, contenedores para llevar, embalaje de productos y envíos, cartones de huevos, cubiertos y aislamiento para construcción.	• Se adhiere fácilmente a muchos disolventes orgánicos. • Punto de fusión: 210 -249°C (Walker, T. R., & Xanthos, 2018). • Densidad $\frac{1}{4}$ - $1,1 \pm 0,19$ g/cm³. • Tiene una vida útil más corta que muchos otros polímeros y es probable que acabe en el medio ambiente con mayor frecuencia (Biber, N. F., Foggo, A., & Thompson, 2019). • Resistencia máxima a la tracción de 28 MPa; Temperatura de deflexión del calor de 92°C (SyBridge Technologies., 2021).

Fuente: Elaboración propia en base a (Wu, S., & Montalvo, 2021).

La **Tabla 4** presenta una descripción detallada de los diferentes tipos de plásticos, sus símbolos



correspondientes, los principales productos en los que se utilizan, así como sus propiedades físicas principales y su biodegradabilidad. Esta información es crucial para comprender mejor la composición y características de los plásticos que se encuentran comúnmente en nuestra vida diaria y para identificar oportunidades para su reciclaje y gestión sostenible.

2.3.1 Tereftalato de polietileno (PET o PETE)

El Tereftalato de polietileno, comúnmente conocido como PET o PETE, es un polímero termoplástico ampliamente utilizado en la fabricación de botellas de bebidas, envases de alimentos y ropa, entre otros. Fue creado en la década de 1940 por John Rex Whinfield y James Tennant Dickson, aunque su producción a gran escala comenzó en la década de 1950. Se caracteriza por su excelente resistencia mecánica, buena barrera contra el dióxido de carbono, y aceptable resistencia al oxígeno y la humedad. Además, presenta alta resistencia química y termoestabilidad. Su densidad es de aproximadamente $1.15 \pm 0.03 \text{ g/cm}^3$ y tiene una resistencia a la tracción de $0.8 \pm 0.14 \text{ N/mm}^2$ (Biber, Foggo y Thompson, 2019).

Imagen 2. Tereftalato de polietileno (PET o PETE)



Fuente: Elaboración propia en base a (Envaselia., 2018).

2.3.2 Polietileno de alta densidad (HDPE)

El Polietileno de Alta Densidad (HDPE, por sus siglas en inglés) es un polímero termoplástico que se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones debido a su tenacidad y resistencia. Este tipo de



plástico se introdujo comercialmente en la década de 1950 y desde entonces ha sido fundamental en la fabricación de envases de leche, botellas de detergente, juguetes, cubos, bancos de parques y tubos rígidos. Con una densidad que varía entre 0.944 y 0.965 g/cm³, el HDPE ofrece una excelente resistencia a la tracción, con valores que oscilan entre 0.20 y 0.40 N/mm². Además, presenta un coeficiente de expansión térmica que varía entre 100 y 220 x 10⁻⁶ y puede soportar temperaturas continuas de hasta 65°C (Rojas, 2023). Su punto de fusión se sitúa en 131°C y su flujo de fusión es de 6.12 g/10 min (Ma, J., & Hesp, 2022).

Imagen 3. Polietileno de alta densidad (HDPE)



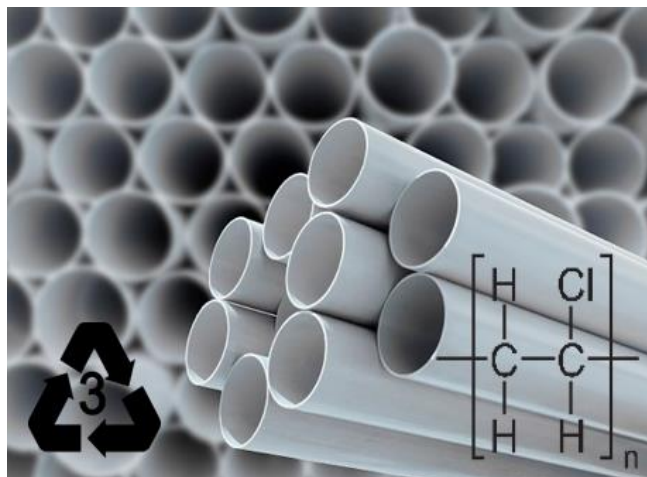
Fuente: Elaboración propia en base a (Envaselía., 2018).

2.3.3 Policloruro de vinilo (PVC)

El Policloruro de Vinilo (PVC) es un plástico versátil que se utiliza en una amplia gama de aplicaciones debido a su durabilidad y resistencia a la intemperie. Fue desarrollado en la década de 1920 y desde entonces ha sido empleado en la fabricación de tuberías para plomería, tarjetas de crédito, juguetes humanos y para mascotas, canalones, mordedores, bolsas de fluido intravenoso, tubos médicos y máscaras de oxígeno. Este polímero sintético tiene una densidad que oscila entre 0.77 y 0.88 g/cm³ (Singh, B., Gupta, M., & Tarannum, 2003). Aunque es resistente a la luz solar y a las inclemencias del tiempo, con el tiempo puede causar granulación. El PVC se compone en un 43% de petróleo crudo y un 57% de sal, y tiene un punto de fusión que varía entre 212 y 310°C.



Imagen 4. Policloruro de vinilo (PVC)



Fuente: Elaboración propia en base a (Envaselia., 2018)

2.3.4 Polietileno de baja densidad (LDPE)

El Polietileno de Baja Densidad (LDPE) es un plástico flexible y transparente que se caracteriza por su resistencia a los productos químicos y su flexibilidad. Fue descubierto y comercializado en la década de 1930 y se utiliza ampliamente en la fabricación de envoltorios plásticos, bolsas para sándwiches y pan, burbujas de embalaje, bolsas de basura, y vasos desechables. Este material presenta una densidad que varía entre 0.93 y 0.97 g/cm³ y una resistencia moderada a aceites y grasas. Puede operar en un rango de temperatura continua de -50°C a +60°C y tiene un punto de ablandamiento de 85°C. Su tasa de fusión es de 0.8 g/min a 190°C (Yan et al., 2015).

Imagen 5. Polietileno de baja densidad (LDPE)

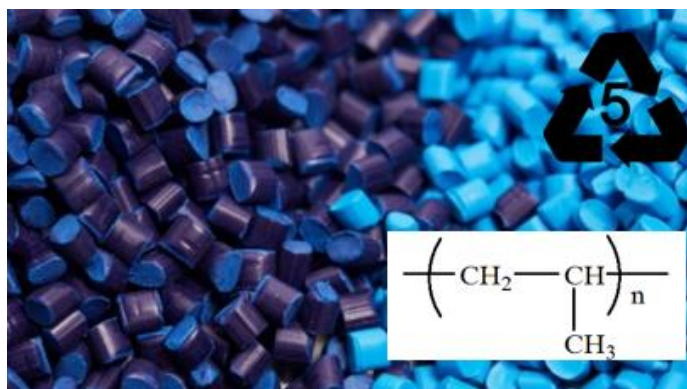


Fuente: Elaboración propia en base a (Envaselia., 2018)



El Polipropileno (PP) es un polímero termoplástico que se destaca por su resistencia a ácidos, bases y solventes, así como por su baja permeabilidad al vapor de agua. Fue descubierto en la década de 1950 y desde entonces ha encontrado aplicaciones en una amplia variedad de productos, como pajillas, tapas de botellas, envases para alimentos calientes y cintas adhesivas. Este material es inodoro y relativamente fácil de procesar. Tiene una densidad de 0.9 g/cm^3 y un índice de fusión de 12 g/min (Jmal, H et al., 2018). Su degradación ocurre a temperaturas superiores a 270°C .

Imagen 6. Polipropileno (PP)



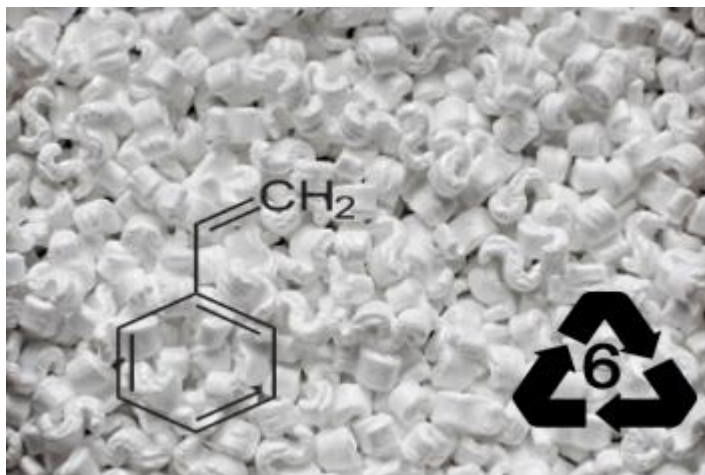
Fuente: Elaboración propia en base a (Envaselia., 2018)

2.3.6 Poliestireno (PS)

El Poliestireno (PS) es un polímero termoplástico ampliamente utilizado en la fabricación de tazas, envases para llevar, embalajes de productos, cartones para huevos, cubiertos desechables y aislamientos para la construcción. Fue desarrollado en la década de 1930 y se caracteriza por su facilidad para ser moldeado y su ligereza. Sin embargo, el PS tiene una vida útil más corta en comparación con muchos otros polímeros, lo que puede llevar a una mayor frecuencia de desechos en el medio ambiente. Tiene un punto de fusión de $210\text{-}249^\circ\text{C}$ y una densidad de aproximadamente $1.1 \pm 0.19 \text{ g/cm}^3$ (Biber et al., 2019).



Imagen 7. Poliestireno (PS)



Fuente: Elaboración propia en base a [\(Envaselia., 2018\)](#)

2.4 Mezclas asfálticas con plástico

La creciente preocupación por la gestión de residuos plásticos ha impulsado investigaciones innovadoras en el sector de la construcción, particularmente en el desarrollo de mezclas asfálticas sostenibles que integran plásticos reciclados como una alternativa viable a los materiales convencionales. Estas investigaciones han explorado diversas estrategias para incorporar residuos plásticos en las mezclas asfálticas, con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas y medioambientales.

Estudios como el de Ismail & AL-Hashmi (2008) han demostrado el potencial de utilizar residuos plásticos como sustitutos de la arena en el concreto, ofreciendo una solución efectiva para reducir costos de materiales y minimizar problemas de desechos [\(Ismail, Z. Z., & Al-Hashmi, 2008\)](#). Assefa (2021) investigó el uso de plásticos de residuos limpios, secos y triturados como agregado en las mezclas asfálticas, con el propósito de mejorar su resistencia a la fractura [\(Assefa, 2021\)](#). Por otro lado, Sukmawan & Arifin (2021) y Mazouz & Merbouh (2019) evaluaron el empleo de plásticos LDPE y PET como aditivos para el asfalto, buscando incrementar la estabilidad de las mezclas y determinar su efecto sobre el comportamiento de recuperación de la fluencia en mezclas asfálticas en caliente, respectivamente [\(Mazouz, M., & Merbouh, 2019; Sukmawan y Arifin, 2021\)](#).

Estos avances han evidenciado el potencial de los plásticos reciclados para transformar las mezclas asfálticas convencionales en soluciones más sostenibles, que no solo ofrecen beneficios



económicos, sino también ambientales al reducir la dependencia de materiales vírgenes y disminuir la cantidad de residuos plásticos destinados a vertederos o al medio ambiente. En esta sección, se analizarán en detalle las diferentes técnicas y aplicaciones de las mezclas asfálticas con incorporación de plásticos, así como los desafíos y oportunidades asociados con su implementación en proyectos de pavimentación sostenible.

2.4.1 Antecedentes de resultados

En los últimos años, diversos estudios han explorado la integración de diferentes tipos de plásticos, como HDPE, LDPE, PET y PP, en las mezclas asfálticas con el objetivo de mejorar sus propiedades. En China, la investigación sobre la incorporación de HDPE/LDPE en mezclas templadas reveló mejoras significativas en el rendimiento a altas temperaturas y una influencia moderada a bajas temperaturas. Estos hallazgos destacan la reducción de la viscosidad del asfalto y el aumento en la estabilidad de la matriz asfáltica en un amplio rango de temperaturas ([Wang et al., 2021](#)).

Por otro lado, estudios realizados en Nigeria y en Indonesia demostraron beneficios notables al incorporar PET/HDPE y PET/LDPE, respectivamente. En Nigeria, se observaron mejoras sustanciales en propiedades marshallianas como estabilidad, flujo y rigidez para mezclas en caliente y templadas ([Akinleye et al., 2020](#)). En el estudio indonesio, se identificó una tendencia creciente en la estabilidad al aumentar el contenido de LDPE, pero se destacó la importancia de equilibrar las proporciones de diferentes plásticos para alcanzar resultados óptimos ([Sukmawan, W., & Arifin, 2021](#)).

Además, investigaciones realizadas en Pakistán, Iraq e Italia han proporcionado insights valiosos sobre la aplicación de HDPE, LDPE, PP y PE en mezclas asfálticas utilizando el método seco. En Pakistán, se resaltó la reducción de la densidad de la mezcla y el aumento en la estabilidad y flujo con el reemplazo parcial de agregados naturales con LDPE y HDPE ([Ullah et al., 2021](#)). El estudio iraquí reveló mejoras en la mojabilidad del ligante asfáltico sobre los agregados y una mejor resistencia contra el daño por humedad con HDPE y LDPE ([Nejad et al., 2013](#)). Mientras tanto, la investigación italiana comparó la resistencia a la fatiga y la rigidez de mezclas modificadas con polímeros plastoméricos y mezclas de plásticos reciclados con grafeno, mostrando resistencia a la fatiga comparable entre ellas ([Cardone et al., 2022](#)).

Sin embargo, a pesar de los avances en la investigación, existe una notable ausencia de estudios



que aborden específicamente el uso de HDPE en mezclas asfálticas. Esta laguna en la literatura resalta la necesidad de investigaciones adicionales para comprender mejor el potencial y las limitaciones de la incorporación de HDPE en mezclas asfálticas, lo que motiva la realización del presente estudio.

2.4.2 Formas de incorporar el plástico en las mezclas asfálticas

El plástico es un material versátil, derivado de compuestos orgánicos o sintéticos, diseñados para ser moldeados en objetos sólidos de diversos tamaños y pesos (Sukmawan, W., & Arifin, 2021). La integración de plásticos en las mezclas asfálticas requiere una consideración cuidadosa debido a las diferentes propiedades que cada tipo de plástico aporta, como se ilustra en la **TABLA 4**. Esta variabilidad hace que los métodos de incorporación en pavimentos varíen según las características del plástico utilizado y el tipo de residuo disponible.

2.4.3 Método seco y húmedo.

Los métodos predominantes para la incorporación de residuos plásticos en mezclas asfálticas son el método seco y el método húmedo.

- En el **método seco**, se utiliza el plástico como un remplazo parcial del agregado grueso o fino, dependiendo del tipo de plástico. Este método aprovecha plásticos rígidos con alta densidad y punto de fusión elevado, como el HDPE o PET (Singh, P., & Swamy, 2019; Haider et al., 2020; Marquez et al., 2021). Por ejemplo, se han estudiado los efectos de la incorporación de escamas de botellas plásticas PET en mezclas asfálticas, sustituyendo diferentes porcentajes del agregado convencional (Moghaddam, et al., 2014). Otros estudios han investigado los efectos de los plásticos HDPE/LDPE en la resistencia al daño por humedad de las mezclas asfálticas (Nejad, et al., 2013).
- Por otro lado, el **método húmedo** consiste en usar plásticos con un punto de fusión más bajo, como LDPE o PP, como modificadores del ligante asfáltico antes de la mezcla con el agregado puro (Awad y Al Adday, 2017; Singh, P., & Swamy, 2019; D'Angelo, J. et al., 2021; Abduljabbar N., et al., 2022). Un ejemplo es el estudio que explora el mejoramiento del rendimiento del asfalto mediante la adición de plástico PP como un sustituto parcial del betún (Awad y Al Adday, 2017).

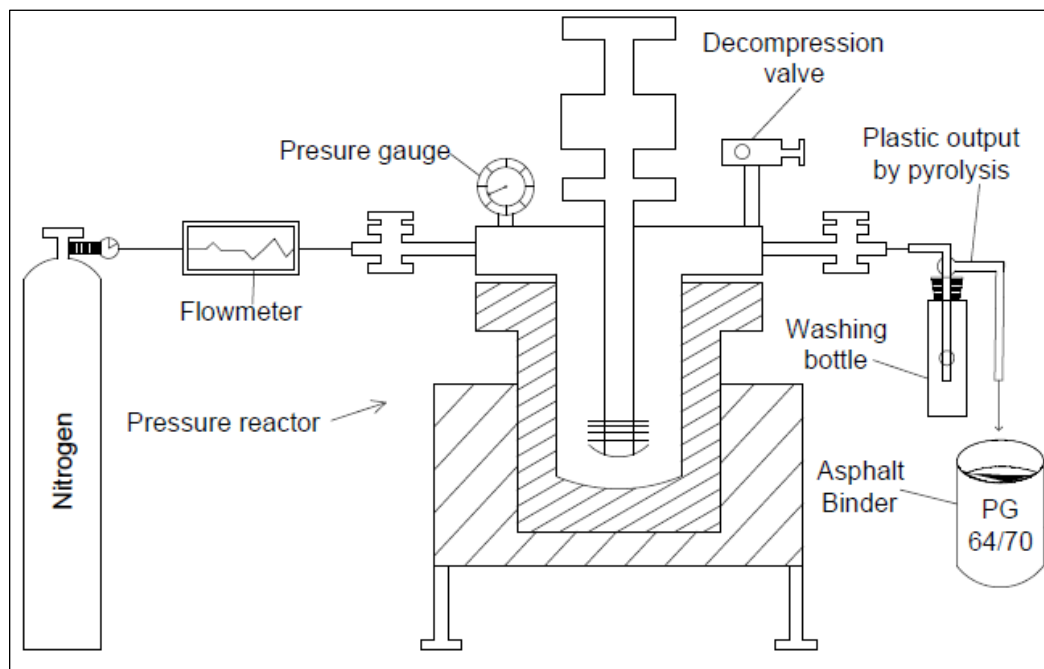


2.4.4 Método de Pirolisis.

El método de pirolisis se presenta como una técnica prometedora para la incorporación de plásticos en mezclas asfálticas. Este proceso implica la degradación térmica de los plásticos en ausencia de oxígeno, lo que facilita su integración en el asfalto (Demirbaş y Arin, 2002). La pirolisis se utiliza principalmente en combinación con el método húmedo para preparar residuos plásticos para su uso como modificadores del ligante asfáltico.

Por ejemplo, Zhou et al. emplearon la pirolisis para preparar residuos de polipropileno (PP) antes de su incorporación en mezclas asfálticas (Zhou G., et al., 2022). Wang et al. utilizaron cera de pirolisis a base de residuos plásticos para modificar un asfalto base 70, evaluando sus propiedades mediante pruebas específicas (Wang Z. et al., 2021).

Imagen 8. Proceso de pirolisis



Fuente: Elaboración propia en base a (Zhou G. et al., 2022)

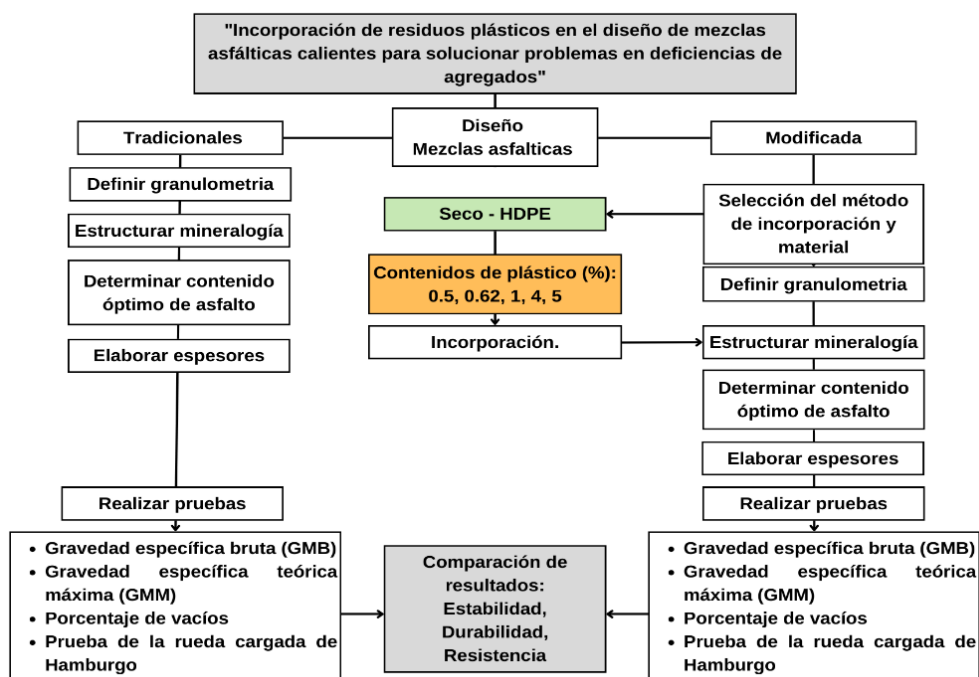


III. METODOLOGÍA

3.1 Desarrollo de metodología

La metodología de esta investigación se estructuró en tres apartados principales, teniendo en cuenta el protocolo AMAAC PA-MA 01/2011 para la creación y estudio de pruebas de desempeño de en las mezclas, con los procedimientos estándar en ingeniería de pavimentos para su desarrollo. Estas etapas se hicieron incluyendo el diseño tradicional de mezclas asfálticas, el diseño modificado con incorporación de residuos plásticos y la comparación de los resultados obtenidos. En la **Imagen 9** se observan los procesos seguidos para el diseño de las mezclas asfálticas en base a la metodología establecida, donde al final de todo el proceso realizado se centró en comparar los resultados de las compactaciones, porcentajes de plásticos apropiados, porcentaje de vacíos y la prueba de la rueda cargada de Hamburgo, para poder medir la estabilidad y resistencia a la deformación del pavimento, en una mezcla asfáltica creada con un diseño tradicional sin residuos y una con un porcentaje de incorporación de plástico en ella que pudiera compactar.

Imagen 9. Diagrama de Metodología



Fuente: Elaboración propia



3.1.1 Diseño Tradicional de Mezclas Asfálticas

La primera parte de esta metodología consiste en la creación de un diseño de mezclas asfálticas tradicional, donde se llevó dicha mezcla sin la incorporación de residuos plástico. Esta fase implicó:

- **Definir granulometría:** Donde se seleccionaron y analizaron los materiales pétreos disponibles en la zona de estudio, desarrollando así una clasificación según el cribado y tamizado según su tamaño de partícula.
- **Estructurar mineralogía:** Aquí se estructuró la mineralogía de los agregados que se utilizarían para las mezclas asfálticas, con el fin de asegurar una distribución adecuada de las partículas y selección adecuada del material.
- **Contenido óptimo de asfalto:** En este paso nos concentramos en la determinación del contenido óptimo de asfalto ligante, para asegurar una cohesión y estabilidad de la mezcla adecuada.
- **Elaborar espesores:** Se prepararon y definieron los espesores adecuados para las futuras pruebas a realizar.
- **Realizar pruebas:** Se realizaron pruebas como la determinar la gravedad específica bruta (GMB) y la gravedad específica teórica máxima (GMM), determinación del porcentaje de vacíos (%Va) y Método de prueba para determinar la resistencia a la deformación permanente y daño por humedad en una mezcla asfáltica en caliente compactada mediante la Rueda Cargada de Hamburgo, utilizando los métodos MAC-II y MAC-III respectivamente ([Asociación Mexicana del Asfalto, 2018](#)).

3.1.2 Diseño Modificado de Mezclas Asfálticas con Incorporación de Residuos Plásticos

En la segunda etapa del desarrollo de la metodología, se enfocó en el desarrolló un diseño de mezclas asfálticas modificadas que pudieran incorporar distintos porcentajes de residuos plásticos, añadiéndolas mediante un proceso seco de HDPE, donde se busca que el polímero remplace de forma parcial el agregado convencional. Este proceso incluyó:

- **Selección de HDPE:** Se optó el uso de polietileno de alta densidad (HDPE) como material de residuo plástico a incorporar en las mezclas asfálticas calientes, debido a las propiedades



mecánicas y de resistencia con las que cuenta este polímero.

- **Concentraciones de HDPE:** Se realizaron mezclas asfálticas modificadas con porcentajes de sustitución de residuos plásticos a estudiar, con valores de 5%, 4%, 1%, 0.62%, 0.5% de HDPE como reemplazo parcial del agregado.
- **Realizar pruebas:** De igual manera que con en el diseño tradicional, se realizaron las mismas pruebas para determinar la gravedad específica bruta (GMB) y la gravedad específica teórica máxima (GMM), determinación del porcentaje de vacíos (%Va) y Método de prueba para determinar la resistencia a la deformación permanente y daño por humedad en una mezcla asfáltica en caliente compactada mediante la Rueda Cargada de Hamburgo, utilizando los métodos MAC-II y MAC-III respectivamente ([Asociación Mexicana del Asfalto, 2018](#)).

3.1.3 Comparación de Resultados

La parte final de la metodología, presenta los resultados de todas las mezclas y se genera una comparativa de los resultados obtenidos de los diseños antes mencionados para determinar el impacto que puede generar el plástico en las propiedades de las mezclas asfálticas calientes y determinar si es una propuesta viable. Este análisis incluyó:

- **Evaluación del porcentaje de vacíos y deformación permanente:** Una vez hechos los cálculos y pruebas pertinentes se evalúa la compactación de las mezclas, porcentaje de vacíos y deformación que se tenga.
- **Comparación de desempeño:** Se compararon las propiedades mecánicas y de resistencia de las mezclas asfálticas hechas tradicionales y modificadas con plástico donde se especifica el porcentaje de plástico seleccionado para la generación de la prueba con la rueda de Hamburgo, con el fin de determinar su desempeño bajo diferentes condiciones de carga y temperatura.

Esta clase de metodologías usadas para el desarrollo de la investigación puede proporcionó una base sólida con el fin de evaluar el potencial de las mezclas asfálticas modificadas con residuos plástico en la creación, conservación y construcción de carreteras en la región de Baja California, México. Pudiendo llegar a generar una solución innovadora y sostenible que pueda mejorar la resistencia y durabilidad de las carreteras frente a los desafíos medioambientales y las necesidades viales específicas de la región ([Harman, T. et al., 1999; Asociación Mexicana del Asfalto, 2011a](#)).



3.2 Diseño de mezclas asfálticas

El diseño para la creación de mezclas asfálticas llevado a cabo en este trabajo fue hecho en base el método Superpave, el cual se basa en un enfoque de diseño y análisis del rendimiento que se puede considerar para las condiciones climáticas y de tráfico específicas del proyecto. Este método fue seleccionado en lugar del método Marshall debido a la flexibilidad que se tiene para incorporar distintos tipos de materiales reciclados, como plásticos o caucho y por su enfoque en el rendimiento a largo plazo de la creación de la mezcla.

3.2.1 Selección de Agregados

Los agregados usados para el diseño de las mezclas asfálticas fueron seleccionados de distribuidores locales de la zona, siguiendo las especificaciones del Manual de ensayos para laboratorio de agregados en mezclas asfálticas y del protocolo AMAAC PA-MA 01/2011 ([Asociación Mexicana del Asfalto, 2011](#); [Ayala del Toro, et al., 2019](#)). Donde los agregados fueron clasificados en 3 categorías específicas: agregados gruesos, agregados finos y polvo mineral.

Tabla 5. Clasificación de agregados

Tipo de Agregado	Tamaño de Partícula
Agregados gruesos	> 4.75 mm
Agregados finos	0.075 mm - 4.75 mm
Polvo mineral	< 0.075 mm

Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Método Superpave

La creación de diseños de mezclas asfálticas por el método Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements) se desarrolló como parte del Programa de Investigación de Carreteras Estratégicas (SHRP) en los Estados Unidos. Este método tiene como objetivo la mejora en la durabilidad y el desempeño de mezclas asfálticas, esto teniendo en cuenta las consideraciones específicas de condiciones climáticas y de tráfico que se tengan. A diferencia del método Marshall, el cual se enfoca principalmente en la estabilidad de las mezclas y el flujo que se tiene, el método Superpave también incorpora pruebas adicionales y modelos predictivos para poder evaluar el comportamiento de la mezcla bajo distintas condiciones específicas, en base al Superpave Asphalt



Mixture Design, Workshop Workbook y el documento Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas ([Harman, et al., 1999](#); [Garnica Anguas, P. et al , 2004](#)).

Principales características del método Superpave:

- **Selección del ligante asfáltico:** Basándonos en el grado de desempeño el asfalto (PG), el cual toma en consideración las temperaturas máximas y mínimas esperadas al momento de la aplicación en la mezcla. Gracias a esto podemos asegurar que el asfalto trabaje de manera óptima bajo temperaturas estipuladas por los proyectos.
- **Diseño de mezcla:** Esta clase de método de diseño para mezclas asfálticas usa una fórmula de graduación continua con el fin de lograr una distribución uniforme del tamaño de las partículas. Esta fórmula en el método Superpave se basa en la selección de la estructura granulométrica del diseño (Mezcla de diseño). Esto consiste en determinar las porciones adecuadas de agregados y las gradaciones combinadas correspondientes del diseño de mezclas asfálticas.
- **Pruebas de desempeño:** Estas pruebas del método Superpave miden el desempeño de las de las mezclas asfálticas creadas, estas incluyen evaluaciones para medir la resistencia a la deformación permanente, agrietamiento y fatiga. Estas pruebas nos ayudan a asegurar si el diseño de la mezclas asfálticas creado pueden mantener la integridad estructural y la funcionalidad bajo ciertas condiciones de carga y ambiente.

El método Superpave es adecuado principalmente para la incorporación de plásticos, debido al enfoque del rendimiento y la capacidad de implementar materiales modificados que puedan llegar a mejorar propiedades mecánicas y de durabilidad de las mezclas asfálticas. La **Tabla 5**, muestra las principales diferencias en las características del método Superpave y Marshall y la razón de por qué utilizar este método en la presente investigación.



Tabla 5. Comparación entre métodos de creación de mezclas asfálticas.

Características	Método de Mezcla asfáltica	
	Superpave	Marshall
Selección del ligante.	Basada en el grado de desempeño, (PG).	Basada en el grado de penetración o viscosidad, (PEN, AC).
Diseño de la mezcla.	Fórmula de graduación continua.	Mezcla de tamaño máximo específico.
Pruebas del desempeño.	Evaluación de resistencias a la deformación, agrietamiento y fatiga.	Estabilidad y flujo.
Flexibilidad para los modificadores.	Alta, se permite incorporación de materiales reciclados y modificados.	Baja, menos adaptable a materiales modificados.

Fuente: Elaboración propia

Proceso:

El proceso para la determinación de la mezcla asfáltica por el método Superpave y de los factores principales del contenido óptimo de asfalto y granulometría del presente trabajo fue hecha basándose en el proceso antes mencionado, estipulado por el manual Superpave Asphalt Mixture Design, Workshop, (D'Angelo, J., et al., 1999).

1. Selección de materiales:

Se identifican y recolectan las muestras representativas a usar de agregados gruesos y finos; Posteriormente se hace un análisis granulométrico de cada muestra obtenida de agregados para definir la gradación y obtener las gravedades específicas (G_{sb}) y aparentes (G_{sa}) de las pilas de agregados.

2. Establecer mezclas de prueba:

Se combinan los agregados de forma individuales en funciones matemáticas para crear las mezclas asfálticas de pruebas, después asegurar que estas cumplan con los requisitos de gradación según las especificaciones del proyecto.



3. Determinar las propiedades de los agregados:

Calcular las gravedades específicas bulk (G_{sb}) y aparente combinadas utilizando las leyes de fracciones parciales.

$$G_{sb} = \frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}$$

Donde:

- G_{sb} es la gravedad específica bulk de la mezcla total de agregados.
- P_i es el porcentaje en peso del agregado i .
- G_i es la gravedad específica bulk del agregado i .

4. Evaluación de propiedades

Se realizar pruebas con el fin de determinar las propiedades de consenso como la angularidad del agregado grueso (CAA), angularidad del agregado fino (FAA), partículas planas y alargadas (F&E), y equivalente de arena (SE), donde se utilizará el método de Huber para estimar esta clase de propiedades para las mezclas de prueba.

$$\text{Propiedad estimada} = \frac{(C_1 * D_1) + (C_2 * D_2) + \dots + (C_n * D_n)}{D_1 + D_2 + \dots + D_n}$$

Donde:

- C es el resultado de la prueba para la propiedad.
- D es la porción de la pila de agregados que se aplican a las propiedades.

5. Determinar el contenido de ligante

Estimar la gravedad específica efectiva G_{se} para las mezclas de prueba usando la fórmula:

$$G_{se} = G_{sb} + 0.8 * (G_{sa} - G_{sb})$$



Después de esto se pudo calcular el volumen de ligante asfáltico absorbido en el agregado V_{ba} :

$$V_{ba} = \frac{P_b * (1 - V_a)}{G_b * G_{se}}$$

Donde:

- V_a es el volumen de vacíos del aire.
- P_b es el porcentaje de ligante.
- G_b es la gravedad específica del ligante.

6. Evaluar las propiedades volumétricas de la mezcla

Utilizar el volumen estimado de ligante efectivo para las mezclas V_{be} :

$$P_{bi} = \frac{P_b * (G_b + P_{be})}{(G_b * (V_{be} + V_{ba})) + W_t}$$

Donde:

- W_t es el peso del agregado.
- P_b es el porcentaje de ligante.
- G_b es la gravedad específica del ligante.
- P_{be} es el porcentaje de ligante asfáltico.
- V_{be} es el volumen estimado de ligante efectivo.
- V_{ba} es el volumen del ligante asfáltico absorbido en el agregado.

3.2.3 Determinación de la Granulometría Óptima

Para determinar la granulometría óptima del proyecto, se siguieron los pasos antes mencionado del procedimiento por el método Superpave, donde también se usaron las fórmulas de Fuller y Thompson con el fin de definir la distribución granulométrica que se desea. El objetivo fue lograr crear una granulometría para una mezcla con una estructura interna densa y bien compactada que proporcione durabilidad y estabilidad. Donde la fórmula es:



$$P = \left(\frac{d}{D} \right)^n \times 100$$

Donde:

- P es el porcentaje que pasa por un tamiz de un tamaño específico.
- d es el tamaño del tamiz.
- D es el tamaño máximo nominal del agregado.
- n es un exponente que usualmente se toma como 0.45 para mezclas asfálticas ya que tiende a llenar mejor los vacíos entre las partículas.

Teniendo en cuenta esta fórmula y las especificaciones del método Superpave, se calcularon las distintas cantidades de cada fracción de agregados pétreos necesarias para alcanzar la granulometría objetivo de la investigación.

3.2.4 Selección del Ligante Asfáltico

La selección del ligante asfáltico para este proyecto fue un cemento asfáltico de grado PG 64-22, teniendo en cuenta las condiciones climáticas y de tráfico en la región de Baja California. Este tipo de ligante puede proporcionar una buena resistencia para la deformación permanente y al agrietamiento térmico, donde se planteó usar un asfalto común para realizar una mezcla asfáltica tradicional sin aditivos y con porcentajes de remplazo de residuos plásticos, basándonos en los Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas ([Garnica Anguas, P. et al , 2004](#)).

3.2.5 Preparación de las Mezclas de Prueba

Se desarrollaron y prepararon mezclas asfálticas de pruebas siguiendo el protocolo AMAAC PA-MA 01/2011 y el método Superpave ([Asociación Mexicana del Asfalto, 2011a](#)). Una vez realizadas las mezclas se compactaron utilizando un compactador giratorio para generar las pastillas de pavimento a las que se le harán las pruebas específicas, simulando las condiciones de campo para garantizar una evaluación precisa del desempeño de la mezcla.



3.2.6 Evaluación y Ajuste de la Granulometría

Las mezclas asfálticas de las pruebas fueron sometidas a distintas pruebas de laboratorio para poder evaluar su desempeño. Estas pruebas incluyeron la determinación de la gravedad específica bruta (Gmb), la gravedad específica teórica máxima (Gmm) el cálculo del porcentaje de vacíos y también susceptibilidad a la deformación permanente mediante la rueda de Hamburgo.

Pruebas realizadas en mezclas asfálticas para evaluar resistencia y estabilidad:

- **Gravedad específica bruta (Gmb):** Realizada en base al método Superpave, siguiendo los métodos y procedimiento del Manual de ensayos para laboratorio, MAC-II.
- **Gravedad específica teórica máxima (Gmm):** Realizada en base al método Superpave, siguiendo los métodos y procedimiento del Manual de ensayos para laboratorio, MAC-III.
- **Determinación del porcentaje de vacíos:** Calculado utilizando las fórmulas proporcionadas por el método Superpave y siguiendo los métodos del Manual de ensayos para laboratorio, para poder determinar el porcentaje de vacíos en las mezclas
- **Prueba para determinar la resistencia a la deformación permanente y daño por humedad en una mezcla asfáltica en caliente compactada mediante la Rueda Cargada de Hamburgo:** Realizada en base al método Superpave, siguiendo los métodos y procedimiento del Manual de ensayos para laboratorio, para poder determinar la resistencia a la deformación y estabilidad, MACC-V.

3.3 Granulometría tradicional

La granulometría final utilizada en el presente estudio fue determinada, en base el método Superpave y ajustada conforme a los resultados de las pruebas antes mencionadas de laboratorio. Este método fue seleccionado por su capacidad de proporcionar una distribución de tamaños de partículas optimas, lo que contribuye a la durabilidad y estabilidad de la mezcla asfáltica. La granulometría específica fue obtenida a través de un proceso de selección y análisis de los agregados.

3.3.1 Selección y Preparación de Materiales

La selección de los distintos y especificos materiales pétreos se realizó tomando las muestras



representativas de los bancos de agregados de la zona. Los materiales se clasificaron en tres categorías específicas: Agregados gruesos, agregados finos y polvo mineral. La clasificación fue llevada a cabo mediante el tamizado, utilizando una serie de tamices estándar con diferentes tamaños de apertura.

3.3.2 Procedimiento de Tamizado

El presente proceso del tamizado implicó la separación de agregados en diferentes fracciones según su tamaño. Los tamices o mallas utilizados fueron los siguientes: 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100 y N°200. Cada fracción fue pesada para determinar el porcentaje de material que pasa y se retiene en cada una de las mallas. La **Tabla 6**, muestra el tamizado de una muestra material de 2374.1 gr usado en la investigación para el presente diseño de mezclas asfálticas.

Tabla 6. Resultados del Tamizado.

Tamiz	% pasa	% Retenido	Masa (gr)
1 1/2"	100.0	0.0	0.0
1"	100.0	0.0	0.0
3/4"	93.3	6.7	159.1
1/2"	83.6	9.7	230.3
3/8"	71.2	12.4	294.4
N°4	43.0	28.2	669.5
N°8	32.5	10.5	249.3
N°16	24.4	8.1	192.3
N°30	18.0	6.4	151.9
N°50	11.8	6.2	147.2
N°100	7.0	4.8	114.0
N°200	4.1	2.9	68.8
Pasa 200	-	4.1	97.3

Fuente: Elaboración propia

3.3.3 Análisis de la Granulometría

La granulometría que se obtuvo muestra una distribución continua y uniforme de los agregados, esenciales para la estabilidad y la capacidad de carga de las mezclas asfálticas. Cada fracción de agregado cumple una función específica dentro de la mezcla:



- **Agregados gruesos:** Proporcionan resistencia para la carga y a la deformación.
- **Agregados finos:** Aumentan la cohesión e interacción interna en la mezcla y ayudan a llenar los vacíos entre agregados gruesos.
- **Polvo mineral:** Actúa como un relleno que mejora la cohesión y la estabilidad de la mezcla.

3.3.4 Ajuste de la Granulometría

Una vez realizadas las pruebas de laboratorio y evaluación de resultados, se hacen los ajustes en la granulometría para cumplir con los requisitos específicos según el método Superpave y asegurar la mejora de desempeño de las mezclas asfálticas. Estos ajustes se basaron en los resultados de la gravedad específica bruta (GMB), la gravedad específica teórica máxima (GMM) y el porcentaje de vacíos, para poder determinar la masa necesaria para la prueba de la rueda cargada de Hamburgo que pueda tener un 7% de vacíos en su estructura.

Fórmulas y Cálculos Utilizados para el ajuste de granulometría:

Para calcular la masa de cada fracción de agregado, se usó la siguiente fórmula:

$$Masa = \frac{\text{Porcentaje de retención}}{100} \times \text{Masa total de la muestra}$$

- La masa total de la muestra fue de 2374.1 gramos.

Cada fracción de agregado se pesó y se registró para poder asegurar que se alcanzara la granulometría necesaria.

Ejemplo de cálculo:

Para el tamiz de 3/4" con un 6.7% de retención:

$$Masa = \frac{6.7}{100} \times 2374.1 = 159.1 \text{ gr}$$



Este proceso se repitió para cada fracción de agregados, asegurando que la sumatoria de los resultados de todas las fracciones den el 100% de la masa total de la muestra trabajada.

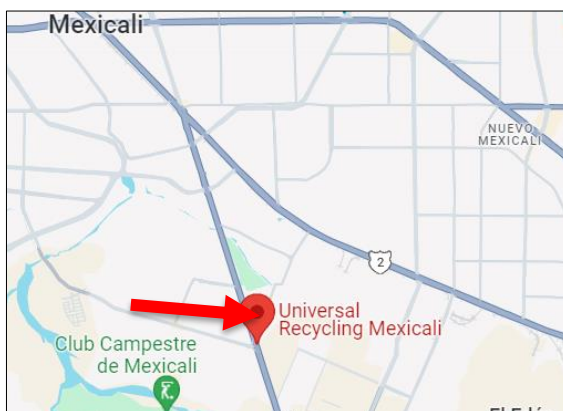
3.4 Recolección de los materiales

La recolección de los materiales es un paso importante para poder asegurar la calidad y consistencia de las mezclas asfálticas. Los materiales utilizados en este estudio fueron seleccionados y recolectados de diferentes proveedores locales en Mexicali, Baja California. A continuación, se detallan los materiales y sus respectivos proveedores.

3.4.1 Plástico HDPE

Primero que nada, el polietileno de alta densidad (HDPE) utilizado en las mezclas asfálticas fue recolectado de Universal Recycling Mexicali, Baja California. Este proveedor se especializa en el reciclaje de plásticos de desperdicios, además de que también trituran el material y así poder usar el tamaño adecuado del HDPE para su incorporación en las mezclas.

Imagen 10. Universal Recycling Mexicali.



Fuente: Elaboración propia

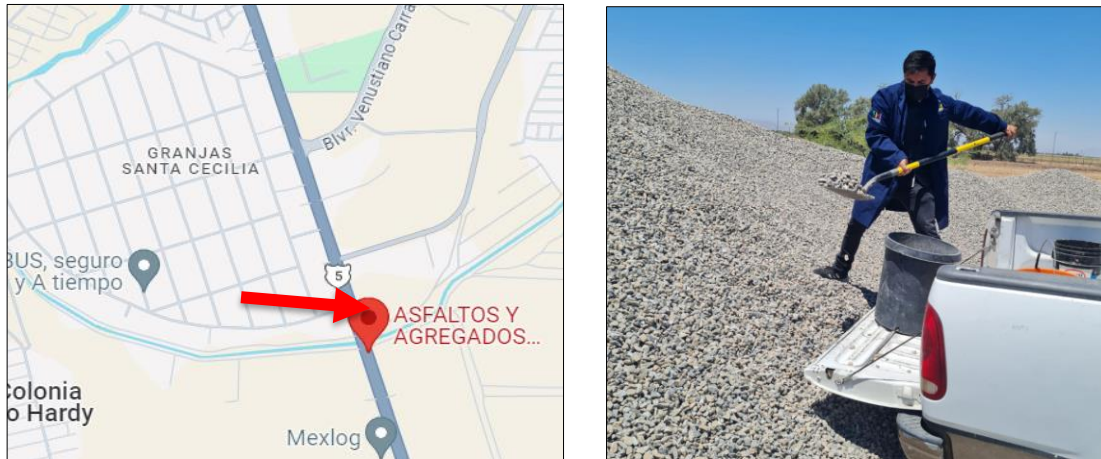
3.4.2 Agregado

Los agregados utilizados en las mezclas fueron proporcionados por Asfaltos Técnicos De La Baja S.A DE C.V. Esta empresa suministra materiales pétreos en la región de baja california, útiles para la elaboración de mezclas asfálticas resistentes y duraderas, con lo que se podrían evaluar este



estudio usando materiales de la zona de estudio.

Imagen 11. Asfaltos Técnicos De La Baja S.A DE C.V.



Fuente: Elaboración propia

Además de los agregados pétreos tradicionales, se planteó el uso de carbonato de calcio brindado también por Asfaltos Técnicos De La Baja S.A DE C.V. El carbonato de calcio se incorporó como parte del filler en las mezclas asfálticas esto debido a la dificultad para obtener el material fino que pasa la malla 200, por sus propiedades específicas. Este material se evaluó por su capacidad para mejorar la cohesión interna y la reducir del contenido de vacíos en la mezcla.

El uso de carbonato de calcio ha sido estudiado en los últimos años para la incorporación de las mezclas asfálticas esto debido a sus posibles beneficios en términos de desempeño mecánico y durabilidad en el pavimento. Su inclusión de las mezclas le permite obtener una mejor compactación y una resistencia a la deformación prometedora, lo que puede traducirse en una mayor vida útil para el pavimento ([Xiangyang Xing et al. 2019](#); [Manfro et al., 2022](#)). La elección de este material se basó en estudios previos y en su capacidad que puede proporcionar una estructura más homogénea y resistente, optimizando en forma el rendimiento general de las mezclas asfálticas.



Imagen 12. Carbonato de calcio.



Fuente: Elaboración propia

La combinación de los agregados y el carbonato de calcio fue utilizada con el fin de poder evaluar las mezclas asfálticas resultantes que cumplen los estándares del desempeño esperados, asegurando que los pavimentos que puedan tratar de ser más duraderos y eficientes bajo las condiciones específicas de uso.

3.4.3 Asfalto

El asfalto utilizado para este trabajo fue proporcionado por Asfaltos y Agregados Industriales S.A. de C.V. Donde se utilizó específicamente el asfalto tipo PG-64, conocido por sus propiedades adecuadas para el clima y condiciones en Mexicali, Baja California.

Imagen 13. Asfaltos Técnicos De La Baja S.A DE C.V.



Fuente: Elaboración propia



3.4.4 Detalles de los Materiales Recolectados

Plástico HDPE:

- Proveedor: Universal Recycling Mexicali
- Ubicación: Mexicali, Baja California
- Uso: Sustitución parcial en porcentajes de los agregados en las mezclas asfálticas.

Agregado:

- Proveedor: Asfaltos Técnicos De La Baja S.A DE C.V
- Ubicación: Mexicali, Baja California
- Uso: Material principal de las mezclas asfálticas, tamizado según granulometría especificada.

Carbonato de calcio:

- Proveedor: Asfaltos Técnicos De La Baja S.A DE C.V
- Ubicación: Mexicali, Baja California
- Uso: Usado como material fino que pasa la malla 200 para mezclas asfálticas.

Asfalto:

- Proveedor: Asfaltos y Agregados Industriales S.A. de C.V
- Ubicación: Mexicali, Baja California
- Tipo: PG-64
- Uso: Ligante en las mezclas asfálticas, que proporciona cohesión y durabilidad.

3.4.5 Proceso de Recolección

Los materiales usados para esta investigación fueron recolectados siguiendo el protocolo de calidad de los materiales establecido (SICT, 2009). Se realizaron pruebas iniciales para asegurar la confiabilidad de cada material y que cumpliera con las especificaciones técnicas requeridas para la investigación. El plástico HDPE fue triturado y cribado para alcanzar el tamaño de partícula adecuado de las estructuras granulométricas antes de su incorporación en las mezclas. Los agregados fueron tamizados y también clasificados según la granulometría establecida en este estudio usando un asfalto PG-64 el cual fue almacenado en condiciones controladas para mantener sus propiedades óptimas.

Estos pasos permitieron el asegurar los materiales utilizados en la investigación fueran de alta



calidad y adecuados para la elaboración de las mezclas asfálticas duraderas y eficientes, tanto en su forma tradicional como modificada con plástico. La recolección y preparación de materiales de calidad son cruciales para el éxito de las mezclas asfálticas. La colaboración con proveedores locales especializados aseguró que los materiales cumplieran con los estándares necesarios para esta clase de investigaciones, permitiendo la evaluación precisa del impacto de la incorporación de plástico HDPE en las mezclas asfálticas.

3.5 Granulometría con remplazo de plástico

El proceso para la incorporación de residuos plásticos en las mezclas asfálticas fue llevado a cabo utilizando el Protocolo AMAAC PA-MA 01/2011 y se realizó siguiendo una metodología rigurosa para poder obtener calidad y consistencia de las mezclas. La incorporación del residuo plástico triturado utilizado fue polietileno de alta densidad (HDPE) se llevó a cabo mediante un proceso detallado de selección y preparación de materiales, tamizado y ajuste granulométrico.

3.5.1 Selección y Preparación de Materiales

El primer paso en la granulometría para el reemplazo parcial de plásticos en las mezclas asfálticas fue mediante la selección de los materiales pétreos disponibles en la región, los cuales fueron sometidos a un proceso de tamizado utilizando mallas mostradas en la **Tabla 6**, de diferentes aberturas para obtener una distribución granulométrica precisa. Las masas de los agregados se pesaron y se registraron meticulosamente.

3.5.2 Procedimiento de Tamizado y Clasificación

El tamizado de los materiales pétreos y plásticos fue llevado de manera simultánea, utilizando las mismas mallas de diferentes aberturas, como se muestra en la **Imagen 10**, de la **sección 3.3.2**. Este proceso permitió clasificar los agregados en diferentes fracciones, desde los más gruesos hasta los más finos.



Imagen 14. Mallas de cribado.



Fuente: Elaboración propia

3.5.3 Incorporación del Plástico HDPE

Para el proceso de la estructuración en la mineralogía y diseño de mezclas asfálticas, se incorporaron residuos plásticos triturados de polietileno de alta densidad (HDPE) en porcentajes específicos. La elección de los porcentajes de remplazo y el tipo de plástico HDPE se realizó mediante un previo análisis de los beneficios y desventajas de la incorporación de los distintos tipos de plásticos para esta clase de estudios, considerando los efectos en la compactación y las propiedades mecánicas que pudieron tener en las mezclas usando la información de la **Tabla 4**. Se utilizó este plástico en particular por sus características específicas mostradas en la **Tabla 8**, ya que se planea usar el residuo plástico triturado como un sustituto de agregado en formas de escamas para el trabajo el material deberá de tener una densidad y resistencia alta además de poder resistir altas temperaturas, por lo que debido a sus características el plástico de triturados de polietileno de alta densidad (HDPE) es una gran opción para la creación de mezclas asfálticas en caliente que incorporan porcentajes de residuos plásticos en su estructura.



Tabla 7. Principales características del material plástico HDPE

Característica	Descripción
No tóxico.	No contiene tóxicos en su composición.
Sustentabilidad.	Se trata de un material 100% reciclable.
Temperatura	Resistencia a altas temperaturas, 110 a 130°C.
Durabilidad	Tiempo de degradación, puede tardar cientos de años en descomponerse
Ligereza.	Material muy ligero
Fácil moldeado.	Presenta un alto punto de fusión, esto significa que este material mantendrá su forma incluso a temperaturas elevadas.
Gran resistencia.	Tiene máxima resistencia química, radiación ultravioleta e impenetrabilidad a la mayoría de gases. Puede soportar productos químicos, solventes, ácidos, detergentes y líquidos de limpieza.

Fuente: Elaboración propia

Imagen 15. Plástico HDPE triturado.



Fuente: Elaboración propia

3.5.4 Proceso de Tamizado del Plástico HDPE

El plástico HDPE utilizado fue triturado en la planta de reciclado y cribado en el laboratorio de mezclas asfálticas, esto con el fin de asegurar que su tamaño fuera comparable al de los agregados dando por resultado que el plástico triturado en su mayor parte es de la malla N°4, con lo que se



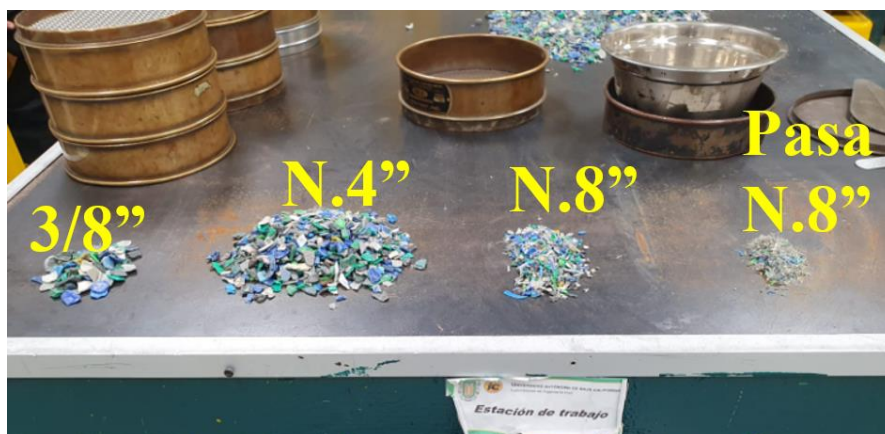
decido que esta sería la malla principal de remplazo del agregado por porcentajes parciales de residuo plástico. Las imágenes a continuación muestran el proceso de cribado del plástico HDPE.

Imagen 16. Tamizado HDPE.



Fuente: Elaboración propia

Imagen 17. Retenidos HDPE



Fuente: Elaboración propia

El cribado permitió obtener las partículas de plástico con un tamaño adecuado para su uso en la incorporación de las mezclas asfálticas.



3.5.5 Comparación de Granulometría del plástico

La granulometría para a mezcla asfáltica con reemplazo de plástico se comparó con la granulometría tradicional para evaluar el impacto del HDPE en las propiedades de las mezclas. La **Tabla 9**, muestran las granulometrías para las pruebas obtenidas de Gmb donde se ocupa una masa de 4500 gr y Gmm donde se ocupa 2500 gr, para los diferentes porcentajes de HDPE con el agregado que se usaron finalmente en la investigación.

Tabla 8. Granulometría HDPE

Mezcla asfáltica	Masa (Gmb)		Masa (Gmm)	
	N.4 (gr)	HDPE (gr)	N.4 (gr)	HDPE (gr)
Tradicional S-P	1269	N/A	705	N/A
0.5%	1246.5	22.5	692.5	12.5
0.62%	1241.1	27.9	689.5	15.5
1%	1224	45	680	25
4%	1089	180	605	100
5%	1044	225	580	125

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos para la granulometría con la adición de HDPE en porcentajes controlados permitió el mantenimiento de una distribución granulométrica similar a la tradicional, con mejoras en la durabilidad y resistencia mecánica de las mezclas. Sin embargo, se observaron desafíos al momento de la compactación y densificación de las mezclas con porcentajes elevados de plástico triturado debido a los efectos de rebote, lo que afectó la densificación adecuada de las mezclas. Estos distintos pasos permitieron obtener una mezcla asfáltica con una granulometría óptima para poder compactarla usando el plástico de remplazo, para las condiciones específicas del proyecto trabajado, con propiedades mecánicas y de durabilidad mejoradas mediante la incorporación de los residuos plásticos.

3.6 Pruebas de laboratorio (Caracterización de los materiales)

La caracterización de los materiales es fundamental para asegurar que los componentes utilizados en las mezclas asfálticas cumplan con las especificaciones técnicas y normativas necesarias. Este



apartado describe detalladamente las pruebas de laboratorio realizadas, incluyendo los procedimientos, equipos utilizados y resultados obtenidos.

3.6.1 Desgaste Mediante la Prueba de los Ángeles de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas (M-MMP-4-04-00/02)

La prueba de desgaste de los Ángeles es una de las pruebas más comunes para evaluar la resistencia al desgaste de los agregados gruesos utilizados en mezclas asfálticas. Esta prueba es crucial porque los agregados están sujetos a condiciones abrasivas debido al tráfico de vehículos, y su durabilidad afecta directamente la vida útil del pavimento (SCT, 2002).

Procedimiento:

Primero, se seleccionó una muestra de agregados que pasara por el tamiz de 37.5 mm y que quedara retenida en el tamiz de 19 mm. Esta muestra se seca en un horno a una temperatura de 110°C hasta obtener un peso constante. Después de esto, la muestra seca se introdujo en el cilindro de la máquina de Los Ángeles junto con una carga estándar de esferas de acero. El cilindro se roto a una velocidad constante de 30-33 revoluciones por minuto durante un total de 500 revoluciones a lo que se le agrego 11 esferas metálicas con un peso de 4584 ± 25 gr como se muestra en la **Tabla 9**.

Evaluación:

Después de completar las revoluciones, la muestra se retiró y se tamizo a través de un tamiz de 1.70 mm. Se pesó el material que pasa por el tamiz para determinar la pérdida de masa debida al desgaste. La fórmula utilizada para calcular el desgaste es:

$$\text{Desgaste de Los Angeles (\%)} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso retenido}}{\text{Peso inicial}} \times 100$$

Esta fórmula proporciona un porcentaje que indica la resistencia al desgaste de los agregados. Un menor porcentaje de desgaste indica una mayor resistencia del material.



Tabla 9. Composición de la muestra de prueba y cargas abrasivas

Tipo de composición de la muestra de prueba	Rango de Tamaños		Masa de la Fracción (gr)	Carga abrasiva	
	(mm)	Designación		Numero de esferas	Masa total (gr)
B	19-25	3/4" - 1 1/2"	2500 ± 10	11	4584 ± 25
	12.5-9.5	1/2" - 3/8"	2500 ± 10		
	Masa Total de Muestra		5000 ± 10		

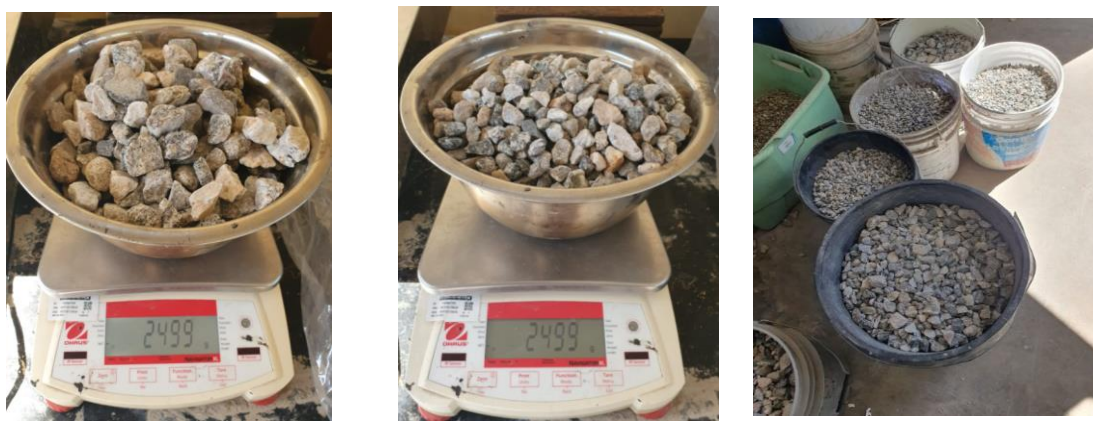
Fuente: (SCT, 2002).

Imagen 18. Máquina de Abrasión de Los Ángeles



Fuente: Elaboración propia

Imagen 19. Muestra de agregado para Abrasión Los Ángeles



Fuente: Elaboración propia



3.6.2 Azul de Metileno de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas (M-MMP-4-04-014/09)

La prueba de azul de metileno (M-MMP-4-04-014/09) fue utilizada con el fin de poder detectar la presencia de arcillas y otra clase de materiales finos en los agregados que pueden afectar de manera negativa en la adhesión del asfalto a los agregados. Esta prueba es esencial para buscar calidad en los agregados finos utilizados en las mezclas asfálticas, asegurando que no contengan ningún clase de materiales que puedan comprometer la integridad del pavimento (ONNCCE., 2004). En este estudio, se utilizó esta prueba para poder comparar el material conocido como filler o mejor dicho el material que pasa por la malla 200, con el carbonato de calcio, el cual es un material ampliamente utilizado en la actualidad debido a sus propiedades mejoradas y determinar si será óptimo para la investigación.

El carbonato de calcio es un mineral que se utiliza como remplazo a dición por el polo mineral que pasa por la malla N.200 en mezclas asfálticas, esto por su capacidad para mejorar la estabilidad y durabilidad de las mismas. Comparar el desempeño del filler tradicional con el carbonato de calcio es crucial para evaluar si el uso de este material puede ofrecer algún beneficio adicional.

Procedimiento:

Preparación de la muestra:

Se preparó una muestra de agregados finos y de carbonato de calcio, asegurándose de que todo el material pasara por un tamiz de 0.075 mm (malla 200). La muestra se mezcló con una solución de azul de metileno de concentración conocida tal como se muestra en la **Tabla 10**.

Agitación:

La mezcla se agitó durante cinco minutos para asegurar una adecuada dispersión del azul de metileno en la muestra. Luego, se filtró la solución y se recogió el filtrado en un recipiente limpio.



Imagen 20. Equipo de agitación para prueba de Azul de Metileno



Fuente: Elaboración propia

Evaluación:

Se añadió azul de metileno a la muestra en incrementos de 1 mililitro, observando la absorción del colorante después de cada adición de este material. La prueba se consideró completa cuando la solución comenzó a mostrar un color azul y se estable sin aumento adicional de intensidad, indicando que los agregados habían podido absorber todo el azul de metileno posible. La cantidad total de azul de metileno absorbida se registró y se utilizó para calcular el valor de azul de metileno, que se expresa como mg/gr de muestra.

La siguiente fórmula se utiliza en el cálculo del índice de azul de metileno requerido en la solución.

$$\text{Índice de azul de metileno} = \frac{\text{Volumen de solución de azul de metileno añadido (ml)}}{\text{Masa de la muestra (gr)}}$$



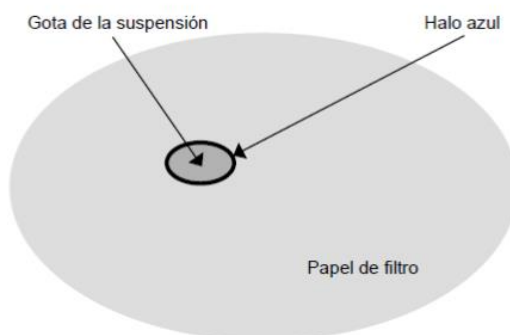
Tabla 10. Datos de materiales.

Muestra	Peso de la Muestra (gr)	Azul de Metileno Añadido (mg)	Valor de Azul de Metileno (mg/g)
Filler	1.001	4	4.00
Carbonato de calcio	0.999	2	2.00

Fuente: Elaboración propia en base a (ONNCCE., 2004).

Este índice proporciona una medida de la cantidad de materiales arcillosos presentes en la muestra. Un índice alto indica una mayor cantidad de arcillas, lo cual es indeseable.

Imagen 21. Formación del halo color azul alrededor de la gota.



Fuente: (IMT, 2009).

Imagen 22. Muestra durante la prueba de Azul de Metileno.



Fuente: Elaboración propia



3.6.3 Modulo Geológico de Corte Dinámico (M-MMP-4-05-025/02)

La presente prueba de la determinación del módulo reológico de corte dinámico y el ángulo de fase de los asfaltos modificados es fundamental para poder evaluar las propiedades visco elásticas de los asfálticos (SCT, 2002). Este ensayo, se realizó teniendo en cuenta el ensayo M-MMP-4-05-025/02, siendo aplicable a cementos asfálticos con módulos complejos en el rango de 0,1 a 1 000 kPa, obtenidos típicamente entre 5 y 85°C. La prueba utiliza un reómetro de corte dinámico (DSR) para medir la respuesta del asfalto bajo esfuerzos de torsión cíclicos tal como se ve en la **Imagen 23** (AASHTO., 2012).

Equipo usado:

- Reómetro de corte dinámico (DSR): Este se utilizado para aplicar esfuerzos de torsión y medir la respuesta del asfalto, este cuenta con un sistema de control de temperatura y registro de datos.
- Platos oscilatorios: Platos metálicos, con diámetros de 8 ± 0.05 mm o 25 ± 0.05 mm, usados para soportar la temperatura de prueba.
- Cámara ambiental: Usado para controlar las temperaturas de las muestras con una precisión de $\pm 0.1^\circ\text{C}$.
- Dispositivo de carga: Aplica una carga sinusoidal de esfuerzo o deformación controlada.
- Sistema de control y registro de datos: Donde se registra la temperatura, frecuencia, ángulo de giro y fuerza o deformación por torsión.

Procedimiento:

Se comenzó por la preparación del material y equipo, calibrando y limpiando los platos metálicos del reómetro. Se seleccionó y estabilizó la temperatura de prueba y se ajustaron los platos a la distancia de prueba necesaria, ya sea de 1 mm o 2 mm según el diámetro que se tenga en el plato. Después en la preparación de la muestra, esta se calentó ligeramente para poder aplicarla de forma fluida el asfalto sin sobrecalentarlo. Después, la muestra se colocó en el plato inferior del reómetro y se presionó con el plato superior para ajustarla. Posterior a esto, se recortó el exceso de muestra y se ajustó la distancia entre los platos para asegurar la correcta disposición



de la misma.

La ejecución de la prueba involucró calentar la muestra a la temperatura de prueba durante 10 minutos, después se aplicaron 10 ciclos de esfuerzo o deformación cíclica a una frecuencia de 10 rad/s. Durante este proceso, el módulo complejo (G^*) y el ángulo fase (δ) fueron registrados automáticamente gracias al programa de trabajo. Finalmente, se procedió a los cálculos y resultados, donde se calculó el módulo reológico de corte dinámico ($G^*/\sin \delta$) y se reportaron los valores obtenidos en kPa y grados con la precisión adecuada, asegurando la fiabilidad de los datos obtenidos.

Imagen 23. Reómetro de corte dinámico.



Fuente: Elaboración propia

3.7 Ensayos de pruebas de laboratorio (Mezclas asfálticas)

En este apartado se presentan los ensayos de laboratorio realizados específicamente en las mezclas asfálticas preparadas para este estudio. A diferencia del apartado anterior, que se centró en la caracterización de los materiales individuales utilizados en las mezclas (agregados, asfalto y plástico HDPE), este capítulo aborda la evaluación de las propiedades de las mezclas asfálticas una vez que han sido compactadas y preparadas para su análisis. Se detallarán los métodos de prueba utilizados para evaluar la compactación, gravedad específica, densidad y porcentaje de vacíos de las mezclas asfálticas, así como la resistencia a la deformación permanente y daño por humedad. Estas pruebas son cruciales para determinar el comportamiento y la durabilidad de las mezclas en condiciones de servicio, permitiendo comparar el desempeño de las mezclas tradicionales con aquellas modificadas mediante la incorporación de plástico HDPE.



3.7.1 MAC-I. Método de prueba para la preparación y compactación de especímenes de mezclas asfálticas en caliente por medio del compactador giratorio.

La preparación y compactación de especímenes de mezclas asfálticas se realizaron utilizando un compactador giratorio, siguiendo el protocolo AMAAC PA-MA 01/2011. Este método es crucial para asegurar que las mezclas asfálticas logren las propiedades deseadas de densidad y estabilidad antes de ser sometidas a pruebas más específicas, como la determinación de la gravedad específica y la resistencia a la deformación. La capacidad de compactación de una mezcla asfáltica es indicativa de su potencial rendimiento en el campo, proporcionando información sobre su durabilidad y resistencia.

El proceso de la presente prueba comienza con la selección y preparación de los materiales, los agregados pétreos fueron cribados y el asfalto utilizado fue PG-64-22. Para la modificación de las mezclas se utilizó plástico HDPE (polietileno de alta densidad) triturado como remplazo parcial, el cual se incorporó en diferentes proporciones para poder evaluar su impacto en las propiedades mecánicas y de compactación de las mezclas.

Procedimiento

1. Preparación de las Mezclas:

Se comenzó con la preparación de las mezclas asfálticas de 4500 gramos y 2500 gramos, estas mezclas se utilizaron para las pruebas de gravedad específica máxima teórica (Gmm) y gravedad específica bruta (Gmb), respectivamente para iniciar el área de las pruebas de compactación. Las mezclas incluyeron tradicionales sin plástico y con diferentes porcentajes de plástico 0.5%, 0.62%, 1%, 4%, y 5% tal como se ve en la **Tabla 8**.

El agregado se calentó a una temperatura de 145°C y asfalto a una temperatura de 135°C para asegurar que el asfalto estuviera lo suficientemente líquido y pudiera fluir para mezclarse de forma uniformemente con los agregados. Luego de esto los materiales se mezclaron hasta obtener una distribución homogénea del asfalto y los agregados. Una vez se añadió el asfalto al agregado se utilizó un revolvedor para asegurar una mezcla uniforme y consistente del material aquí fue el punto donde se incorporó el plástico en su caso, una vez hecho esto la mezcla obtenida se colocó en charolas planas para dejar que la mezcla asfáltica reposara.



Imagen 24. Preparación de mezcla asfáltica.



Fuente: Elaboración propia

2. Compactación:

Las compactaciones de las mezclas asfálticas se realizaron utilizando un compactador giratorio, siguiendo el proceso establecido por el manual de ensayos para pruebas de laboratorio, donde se establece que el compactador debe aplicar una presión controlada donde se simulen las condiciones de tráfico sobre el pavimento. Las mezclas se colocaron en moldes y se compactó a una presión de 600 kPa y una temperatura de 135°C. Se aplicaron 100 revoluciones para asegurar una compactación adecuada, siguiendo el protocolo AMAAC ([Ayala del Toro, et al., 2015](#)).



Imagen 25. Compactador giratorio.



Fuente: Elaboración propia

Se prepararon especímenes sin plástico, y con 0.5%, 0.62%, 1%, 4%, y 5% de HDPE. Los especímenes con 1%, 4% y 5% de HDPE no lograron compactarse adecuadamente debido al efecto de rebote del plástico, lo que sugiere que cantidades excesivas de plástico interfieren con la cohesión de la mezcla. Posteriormente, se observó que la mezcla con 1% de HDPE mostró una mejora, pero no logró compactarse completamente debido a problemas de cohesión. En contraste, se optó por usar el 5% de la malla No. 4 en lugar del 5% del total de la masa de la mezcla, equivalente al 0.62% de la mezcla total usando HDPE. Esto mostró una buena compactación, indicando que este porcentaje es más adecuado para su uso en pavimentos flexibles a lo que se optó por también realizar una mezcla del 0.5% de remplazo la cual también se pudo compactar de forma adecuada.

3. Evaluación de Resultados:

Los resultados mostraron que las mezclas con altos porcentajes de HDPE (4% y 5%) no se compactaron adecuadamente, sugiriendo que cantidades excesivas de plástico interfieren con la



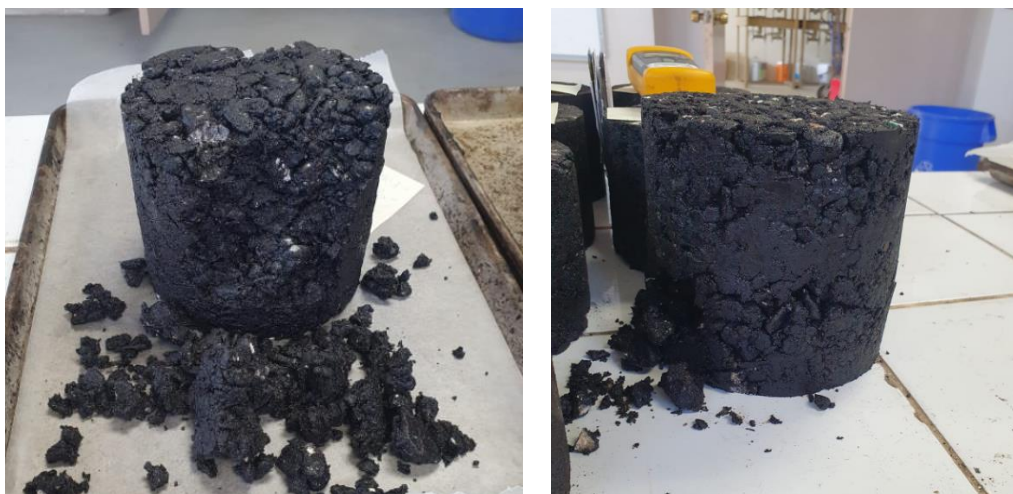
cohesión de la mezcla. En contraste con, las mezclas con 0.62% y 0.5% de HDPE que mostraron una buena compactación, lo que indica que este porcentaje es más adecuado para su uso en pavimentos flexibles. Además, se observó que la mezcla con 1% de HDPE, aunque mostró cierta mejora en la compactación, aún presentaba problemas de cohesión, lo que llevó a su descarte para ensayos posteriores.

Imagen 26. Mezcla asfáltica con HDPE compactada adecuadamente



Fuente: Elaboración propia

Imagen 27. Mezcla asfáltica con 5% y 4% de HDPE.



Fuente: Elaboración propia



Equipos Utilizados

- Horno: Para calentar los agregados y el asfalto con capacidad de alcanzar hasta 150°C.
- Revolvedor: Para mezclar homogéneamente los agregados y el asfalto.
- Compactador Giratorio: Para la compactación de las mezclas a una presión y temperatura controladas.

3.7.2 MAC-II. Método de prueba para determinar la gravedad específica bruta y densidad de la mezcla asfáltica compactada (Gmb).

La prueba para determinar la gravedad específica bruta (Gmb) y la densidad de las mezclas asfálticas compactadas es fundamental para poder evaluar la calidad y el rendimiento de las mezclas asfálticas. Estas pruebas permiten determinar la densidad de la mezcla una vez compactada, lo cual es algo crucial para poder predecir su comportamiento en el campo. La capacidad de la mezcla para alcanzar una densidad adecuada está directamente relacionada con su durabilidad y resistencia al tráfico vehicular de la investigación en parte.

Procedimiento

El procedimiento de esta prueba comienza con la preparación de los especímenes de mezclas asfálticas ya compactadas, los cuales fueron descritas en el apartado **3.7.1.** mas a detalle. Estas muestras creadas incluyeron mezclas tradicionales sin plástico y mezclas con diferentes porcentajes de plástico triturado reciclado HDPE (0.5%, 0.62%, 1%, 4%, y 5%).

Como se mencionó anteriormente los especímenes fueron compactados usando un compactador giratorio bajo las condiciones de pavimentación descritas. Una vez estas mezclas fueron compactadas, los especímenes fueron enfriados a temperatura ambiente para estabilizar sus propiedades físicas antes de proceder con la prueba del cálculo Gmb. Este enfriamiento es esencial para poder garantizar que los resultados no sean afectados por variaciones de temperatura que puedan alterar la densidad y la cohesión de la mezcla por lo que se dejaron las pastillas compactadas al aire libre durante 24 hr para regular su calor interno y que estuvieran en temperatura ambiente.

Para la determinación de la gravedad específica bruta (Gmb), se usó una balanza de precisión para medir el peso seco (al aire) de cada espécimen. Luego de esto, los especímenes fueron sumergidos en agua a una temperatura de $25 \pm 1^\circ\text{C}$ durante un período específico para asegurar la saturación



completa del espécimen. Este paso fue crucial ya que la absorción de agua puede influir significativamente en la medición de la densidad de los pavimentos, después de la saturación, se determinó el peso sumergido de cada espécimen.

La medición del peso sumergido se realizó usando la misma balanza de precisión, asegurando que todas las mediciones fueran consistentes y tuvieran una precisión igual de pesos. Con estos datos, se procedió a calcular la gravedad específica bruta (G_{mb}) utilizando la siguiente fórmula:

$$G_{mb} = \frac{A}{B - C}$$

Donde:

A es la masa del espécimen usado seco al aire.

B es la masa saturada superficialmente seca.

C es la masa del espécimen sumergido en agua.

Este cálculo permite determinar la densidad de la mezcla asfáltica compactadas, que es un indicador del crítico de su capacidad para poder resistir las cargas por el tráfico y las condiciones ambientales, donde no se pudo determinar el G_{mb} de todas las pastillas debido a los problemas en la compactación.

Calculo de absorción de agua:

Una vez determinada la gravedad especifica bruta de las mezclas se puede calcular la absorción de agua que es una medida crítica en la evaluación de mezclas asfálticas, ya que indica la cantidad de agua que un espécimen puede llegar a absorber bajo condiciones específicas. Este parámetro se expresa como un porcentaje del volumen total del espécimen. La absorción de agua está parcialmente relacionada con la porosidad y la densidad del material de las mezclas asfálticas y sus cálculos son esenciales para determinar la gravedad específica bruta (G_{mb}) de las mezclas asfálticas compactadas. El proceso implica medir la masa del espécimen seco al aire, su masa saturada superficialmente seca y su masa sumergida en agua, lo cual ya se realizó anteriormente. Estas mediciones nos permiten calcular la absorción de agua y a su vez ajustar la densidad aparente de las mezclas. El cálculo del G_{mb} , que se calcula utilizando estas mediciones, proporciona es una



indicación clara de la capacidad de la mezclas para alcanzar una densidad adecuada y por lo tanto su durabilidad y rendimiento en condiciones de tráfico vehicular y ambientales.

Este cálculo se realiza con la fórmula:

$$\text{Absorción de Agua (\%)} = \left(\frac{B - A}{B - C} \right) \times 100$$

Donde:

A es la masa del espécimen seco al aire.

B es la masa saturada superficialmente seca.

C es la masa del espécimen sumergido en agua.

La fórmula se deriva de la relación entre el agua absorbida por el espécimen y su volumen aparente.

Equipos Utilizados

- Horno: Para calentar los agregados y el asfalto a 150°C.
- Revolvedor: Para mezclar homogéneamente los agregados y el asfalto.
- Compactador Giratorio: Para la compactación de las mezclas a una presión y temperatura controladas.
- Balanza de Precisión: Para medir el peso seco y sumergido de los especímenes.
- Banco para masa sumergida: Para la inmersión y saturación de los especímenes.

Imagen 28. Banco para masa sumergida



Fuente: Elaboración propia



Este ensayo es crucial para asegurar que las mezclas asfálticas compactadas cumplan con las especificaciones técnicas necesarias para garantizar su rendimiento y durabilidad en aplicaciones de pavimentación. La correcta determinación de la gravedad específica bruta permite evaluar la compacidad de la mezcla y predecir su comportamiento bajo condiciones de servicio.

Imagen 29. Mezcla asfáltica sumergida



Fuente: Elaboración propia

3.7.3 MAC-III. Método de prueba para determinar la gravedad específica teórica máxima y densidad de la mezcla asfáltica (Gmm).

El presente método de prueba para determinar la gravedad específica teórica máxima (Gmm) de la mezcla asfáltica es importante para poder evaluar la densidad teórica de los pavimentos sin compactar. Este ensayo nos proporciona información crucial sobre la capacidad de la mezcla para alcanzar una compactación óptima y su relación con la densidad y la durabilidad del pavimento. La prueba MAC-III sigue procedimientos rigurosos establecidos en el Manual de Ensayos para Laboratorio del Instituto Mexicano del Transporte (IMT), asegurando la consistencia y precisión en los resultados.



Procedimiento

El procedimiento comenzó con la preparación de las muestras de mezcla asfáltica, las cuales fueron compactadas previamente según se explicó anteriormente, se utilizaron diseños mezclas sin y con residuos plásticos y con diferentes porcentajes de plástico HDPE (0.5%, 0.62%, 1%, 4%, y 5%). Cada muestra fue enfriada a temperatura ambiente para estabilizar sus propiedades físicas antes de proceder con la prueba de gravedad específica teórica máxima (Gmm).

Imagen 30. Mezcla asfáltica sin compactar



Fuente: Elaboración propia

Para la determinación de la Gmm, se siguieron los pasos detallados a continuación. Primero, se seleccionaron muestras representativas de la mezcla asfáltica y se pesaron en su condición seca al aire (A). Luego, se colocaron las muestras en un picnómetro y se llenó el picnómetro con agua, asegurando que la mezcla estuviera completamente sumergida. El peso del picnómetro sumergido con la muestra (C) y el peso del picnómetro sumergido sin la muestra (B) se registraron utilizando una balanza de precisión. Con estos valores, se calculó la gravedad específica teórica máxima utilizando la siguiente fórmula:



$$G_{mm} = \frac{A}{A - (C - B)}$$

Donde:

A es la masa de la muestra seca al aire.

B es la masa del picnómetro sumergido.

C es la masa del picnómetro y muestra sumergida.

Este cálculo permitió determinar la densidad teórica máxima que podría alcanzar la mezcla asfáltica sin compactar, proporcionando una referencia crítica para evaluar la capacidad de la mezcla para alcanzar la densidad deseada durante la compactación.

Imagen 31. Picnómetro



Fuente: Elaboración propia

Equipos Utilizados

- Horno: Utilizado para poder calentar los agregados y el asfalto a una temperatura de 150°C, asegurando que el asfalto esté lo suficientemente líquido para mezclarse uniformemente con los agregados.
- Revolvedor: Empleado para mezclar homogéneamente los agregados y el asfalto, garantizando una distribución uniforme de los componentes.



- Compactador Giratorio: Usado para la compactación de las mezclas a una presión controlada de 600 kPa y una temperatura de 135°C, simulando las condiciones de tráfico sobre el pavimento.
- Balanza de Precisión: Utilizada para medir el peso seco y sumergido de los especímenes con alta precisión.
- Picnómetro: Usado para poder determinar la masa del picnómetro sumergido con el agregado, esencial para el cálculo de la gravedad específica teórica máxima.
- Banco para masa sumergida: Para la inmersión y saturación de los especímenes.

Este ensayo es crucial para poder asegurar que las mezclas asfálticas puedan lograr la densidad deseada durante la compactación, lo que es esencial para garantizar la durabilidad y el rendimiento del pavimento. La correcta determinación de la Gmm proporciona una referencia crítica para evaluar la calidad de la mezcla asfáltica y su capacidad para resistir el tráfico y las condiciones ambientales.

3.7.4 Cálculo de porcentaje de vacíos.

El cálculo del porcentaje de vacíos en las mezclas asfálticas es fundamental para poder evaluar la calidad y el comportamiento de los pavimentos. Los vacíos en una mezcla asfáltica son espacios que no están llenos por asfalto ni de agregados y su cantidad puede influir significativamente en las propiedades mecánicas y de durabilidad del pavimento. Un porcentaje de vacíos correcto puede asegurar que el pavimento tendrá la densidad, estabilidad y resistencia necesarias para soportar el tráfico específico de proyecto y las condiciones ambientales a las que estará expuesto.

El porcentaje de vacíos en las mezclas asfálticas proporciona una medida de la compactación alcanzada y la densidad de la mezcla. Es crucial mantener un equilibrio adecuado: si el porcentaje de vacíos es demasiado bajo, puede indicar un exceso de compactación, lo que podría resultar en la deformación del pavimento bajo cargas pesadas. Por otro lado, si el porcentaje de vacíos es demasiado alto, puede señalar una insuficiente compactación, lo que puede llevar a una reducción en la durabilidad del pavimento, permitiendo la infiltración de agua y aire, acelerando así el proceso de oxidación y envejecimiento del asfalto.

Procedimiento:

El porcentaje de vacíos se calcula utilizando las mediciones de la gravedad específica teórica



máxima (G_{mm}) y la gravedad específica bruta (G_{mb}) de la mezcla asfáltica. Estos valores se obtienen a través de las pruebas descritas en los apartados anteriores (MAC-II y MAC-III).

Obtención de G_{mm} y G_{mb} :

Gravedad específica teórica máxima (G_{mm}): Este valor representa la máxima densidad teórica que puede alcanzar una mezcla asfáltica sin compactar. Se determina mediante la fórmula antes mencionada:

$$G_{mm} = \frac{A}{A - (C - B)}$$

Gravedad específica bruta (G_{mb}): Este valor representa la densidad de la mezcla asfáltica compactada. Se determina mediante la fórmula antes mencionada:

$$G_{mb} = \frac{A}{B - C}$$

El porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$\%Va = \left(\frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right) \times 100$$

Donde:

%Va es el porcentaje de vacíos.

G_{mm} es la gravedad específica teórica máxima.

G_{mb} es la gravedad específica bruta.



Imagen 32. Vacíos en pastillas de mezclas asfálticas.



Fuente: Elaboración propia

En resumen, el cálculo para determinar el porcentaje de vacíos utilizando las gravedades específicas teóricas máximas (G_{mm}) y las gravedades específicas brutas (G_{mb}) son herramientas cruciales para evaluar la calidad de la compactación de las mezclas asfálticas. Los resultados de este estudio demuestran que la adición de plástico HDPE en pequeñas cantidades puede mejorar las propiedades de compactación y densidad de la mezcla, mientras que cantidades excesivas pueden comprometer la cohesión y la calidad del pavimento. Estas son 2 pruebas cruciales para poder determinar el porcentaje de vacíos y de esa manera poder saber el porcentaje que se tiene para las masas de las pastillas de las mezclas específicas especiales de trabajo.



3.7.5 MAC-V. Método de prueba para determinar la resistencia a la deformación permanente y daño por humedad en una mezcla asfáltica en caliente compactada mediante la Rueda Cargada de Hamburgo.

La prueba del método de prueba para determinar la resistencia a la deformación permanente usando la rueda cargada de Hamburgo (MAC-V), se enfoca en evaluar la estabilidad, resistencia y el daño por humedad en mezclas asfálticas compactadas. Esta evaluación se lleva a cabo utilizando el equipo de la Rueda Cargada de Hamburgo, que simula las condiciones de cargas repetidas y presencia de agua sobre los pavimentos. Este método es esencial para determinar la durabilidad y el comportamiento de las mezclas asfálticas bajo condiciones de tráfico real.

Procedimiento:

Preparación de los especímenes:

Una vez calculados los porcentajes de vacíos de las muestras de las mezclas asfálticas, se realiza la prueba de la rueda cargada de Hamburgo y buscar obtener especímenes con un contenido de vacíos del 7% según normas específicas, a lo que se debe seguir una serie de pasos y cálculos específicos mencionados en el "Manual de Ensayos para Laboratorio" y otros documentos relacionados con las mezclas asfálticas.

El contenido de vacíos del 7% es considerado óptimo para poder evaluar la prueba de la rueda cargada de Hamburgo ya que simula de una manera efectiva las condiciones reales de uso y permite evaluar la resistencia a la deformación permanente y el daño por humedad. Un contenido de vacíos adecuado llega a asegurar que las mezclas puedan tener suficiente espacio para la deformación sin que el agregado se mueva de lugar y así permita que el ligante asfáltico cubra de forma adecuada los agregados, mejorando la cohesión y durabilidad.

Fórmula y Ajuste de Masas para Especímenes con 7% de Vacíos:

Para ajustar las masas de los especímenes con el fin de obtener un 7% de vacíos, se necesita calcular las masas de las mezclas requeridas usando la fórmula específica que se deriva del volumen del espécimen y la gravedad específica teórica máxima (Gmm).

Pasos a Seguir:

- 1. Determinar el Volumen Estimado del Especimen a Compactar (Vest):**



$$V_{est} = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) * H * 0.001$$

Donde:

- V_{est} es el volumen del espécimen en cm^3 .
- D es el diámetro del espécimen en mm.
- H es la altura del espécimen en mm.

2. Calcular el Volumen Medido en los Especímenes de Diseño (V_{med}):

$$V_{med} = \frac{M_{sss} - M_{sum}}{G_{mm}}$$

Donde:

- M_{sss} es la masa del espécimen saturado superficialmente seco en gramos.
- M_{sum} es la masa del espécimen sumergido en gramos.
- G_{mm} es la gravedad específica teórica máxima de la mezcla.

3. Aplicar el Factor de Corrección al Volumen (V_{corr}):

$$V_{corr} = \frac{V_{med}}{V_{est}}$$

4. Determinar la Masa de la Mezcla Requerida (M):

Debido a que 7% de vacíos de aire es igual al 93% de G_{mm} , entonces:

$$G_{mb} = G_{mm} * 0.93$$

$$M = G_{mb} * V_{corr}$$

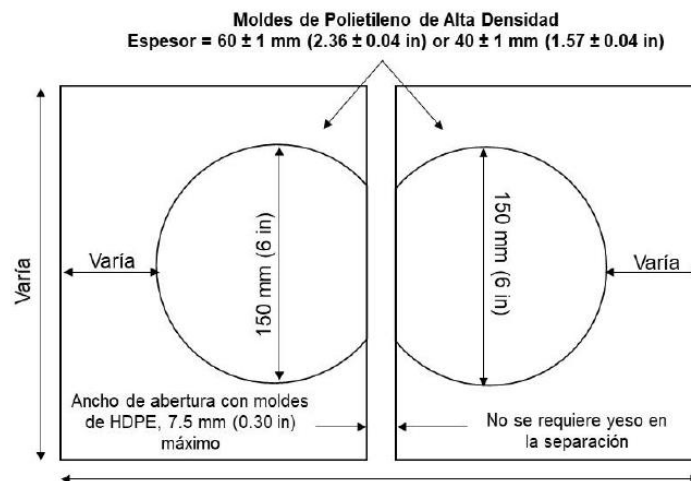
De esta manera utilizando este proceso se puede determinar la modificación para obtener la Masa de la mezcla requerida para iniciar con la prueba de la rueda de Hamburgo, siguiendo el proceso especificado en el diseño Superpave.

Una vez obtenida la masa modificada requerida para la creación de las mezclas asfálticas



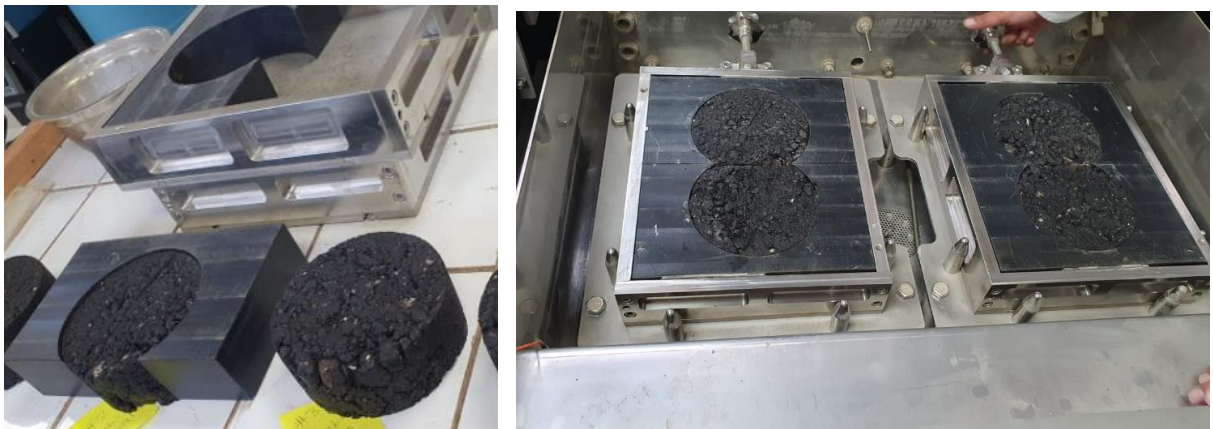
específicas se combinaron y compactados las mezclas utilizando el compactador giratorio, siguiendo el protocolo previamente explicado. Las mezclas incluyeron proporciones de HDPE (0.5%, 0.62%) esto al ser las mezclas que se pudieron compactar y a las que se les pudo aplicar las pruebas pertinentes, debido al bajo contenido de plástico, además de las mezclas sin plástico para comparación de los resultados. Cada espécimen fue compactado hasta alcanzar una altura mínima de 60 mm y densidad necesaria para asegurar condiciones uniformes durante la prueba.

Imagen 33. Dimensiones de moldes plásticos



Fuente: (Ayala del Toro, et al., 2015).

Imagen 34. Moldes para rueda de Hamburgo



Fuente: Elaboración propia



La **Imagen 33** muestra los moldes de polietileno de alta densidad utilizados para preparar los especímenes. Estos moldes tienen un diámetro de 150 mm y un espesor de 60 mm, permitiendo obtener especímenes con características dimensionales precisas.

Configuración de la prueba:

La Rueda Cargada de Hamburgo fue configurada para aplicar una carga repetitiva sobre los especímenes a una temperatura controlada de 50°C. Este equipo aplica una carga de 705 N (158.6 lbf) a través de una rueda de acero que se mueve de ida y vuelta sobre los especímenes, sumergidos en agua a una temperatura de 50°C. El número de ciclos de carga se estableció en 20,000 pasadas para cada espécimen.

Registro de datos:

Durante la prueba, se registraron varios parámetros clave, incluyendo la gravedad específica bruta (Gmb), la gravedad específica teórica máxima (Gmm), el contenido de vacíos (%Va), la profundidad de la rodera a diferentes números de pasadas, y la pendiente de la zona secundaria de deformación. Estos datos son esenciales para evaluar la resistencia a la deformación permanente y el daño por humedad en las mezclas asfálticas.

Evaluación de Resultados

La evaluación de los resultados de la prueba de Rueda Cargada de Hamburgo se centra en varios aspectos clave:

- **Profundidad de Rodera:** Se mide la profundidad de la rodera en diferentes números de pasadas, lo que indica la resistencia de la mezcla a la deformación bajo carga repetida. Una menor profundidad de rodera sugiere una mayor resistencia a la deformación.
- **Pendiente de la Zona Secundaria:** Se analiza la pendiente de la zona secundaria en la gráfica de profundidad de rodera. Esta pendiente proporciona información sobre la tasa de deformación acumulada después de un cierto número de pasadas.
- **Daño por Humedad:** La presencia de agua durante la prueba permite evaluar la susceptibilidad de la mezcla al daño por humedad. Las mezclas que muestran una mayor deformación en presencia de agua son más susceptibles al daño por humedad.

Equipos Utilizados

- Rueda Cargada de Hamburgo: Para aplicar una carga repetitiva sobre los especímenes y simular condiciones de tráfico real.
- Moldes de Polietileno de Alta Densidad: Para preparar especímenes con dimensiones



precisas.

- Balanza de Precisión: Para medir los pesos seco y sumergido de los especímenes.
- Recipiente de Agua: Para sumergir los especímenes durante la prueba.

Imagen 35. Equipo de la Rueda Cargada de Hamburgo



Fuente: Elaboración propia

La prueba de Rueda Cargada de Hamburgo es crucial para evaluar la durabilidad y el comportamiento de las mezclas asfálticas bajo condiciones de tráfico real y presencia de humedad. Los resultados obtenidos proporcionan información valiosa sobre la resistencia a la deformación permanente y la susceptibilidad al daño por humedad, es fundamental para diseñar pavimentos duraderos y resistentes. Esta prueba permite identificar mezclas que pueden tener un desempeño inferior y ajustar las formulaciones para mejorar sus propiedades mecánicas y de durabilidad.

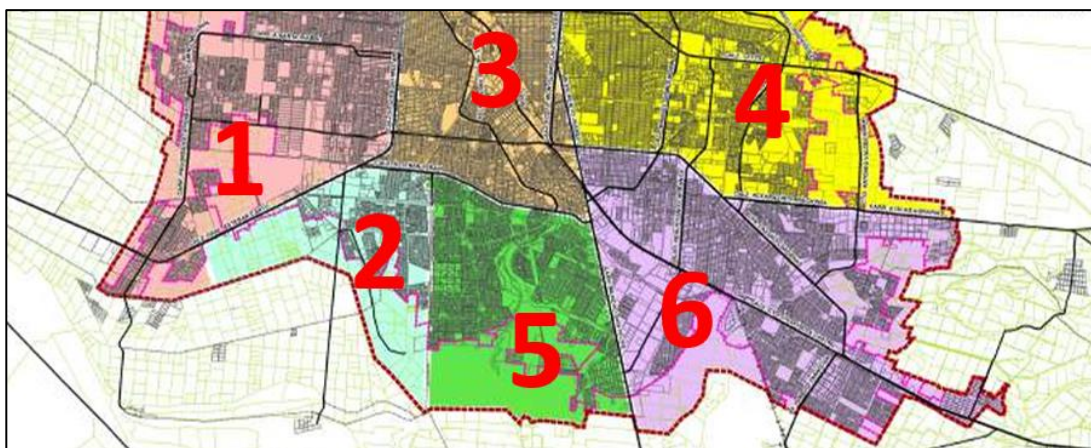


IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Entrevista a recicladoras Baja California.

En esta sección se realizaron entrevistas del impacto ambiental, se presentan los resultados obtenidos tras investigar la acumulación de residuos plásticos en la región de Baja California. Se llevaron a cabo entrevistas en 19 recicladoras distribuidas en distintas zonas urbanas de Mexicali, Baja California, tal como se ve en la **Imagen 36**, según el instituto de investigación y planeación urbana de Mexicali, con el propósito de evaluar el estado del reciclaje de plástico en la región.

Imagen 36. Delimitación de los barrios de Mexicali, Baja California.



Fuente: ([Instituto de investigacion y planeacion urbana Mexicali, 2020](#)).

Las entrevistas incluyeron preguntas sobre la práctica del reciclaje de plásticos, los métodos utilizados (reciclado, materiales recolectados y trituración), los tipos de plástico manejados. Donde los datos recopilados se presentan en la **Tabla 11**, donde se destaca que solo tres de las recicladoras encuestadas reciclan residuos plásticos, mientras que las demás se enfocan en materiales tradicionales como aluminio y metal. Estos resultados resaltan la necesidad de promover el reciclaje de plástico en Mexicali y fomentar la participación de más recicladoras en el tratamiento de este material.



Tabla 11. Resultados de entrevistas de recicladoras.

No.	Zona	Material reciclan	Plástico	Tipo de plástico	Peso Anual	Trituran el plástico
1	1, 3	Aluminio, Metal	No	-	-	-
2	5	Aluminio, Metal	No	-	-	-
3	1	Aluminio, Metal	No	-	-	-
4	1	Aluminio, Metal	No	-	-	-
5	1	Aluminio, Metal	No	-	-	-
6	2	Aluminio, Metal, Plástico	Si	PET	No	No
7	1	Aluminio, Metal	No	-	-	-
8	6	Aluminio, Metal	No	-	-	-
9	6	Aluminio, Metal	No	-	-	-
10	5	Metal, Plástico, Papel, Cartón	Si	PET, HDPE, LDPE	28.8 kg	Si
11	6	Aluminio, Metal, Papel, Cartón	No	-	-	-
12	5	Aluminio, Metal, Cartón	No	-	-	-
13	6	Metal, Plástico, Papel, Cartón	Si	PET, HDPE, LDPE, PVC, PP	32 a 40 T	Si
14	5	Metal, Papel, Cartón	No	-	-	-
15	6	Aluminio, Metal, Vidrio	No	-	-	-
	5	Aluminio, Metal	No	-	-	-
17	6	Aluminio, Metal	No	-	-	-
18	6	Metal	No	-	-	-
19	6	Aluminio, Metal	No	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de estas encuestas indican una baja práctica referente al reciclaje de plásticos en Mexicali, destacando la necesidad de promover políticas y programas que puedan fomentar el reciclaje y la reutilización de plásticos. La implementación de plásticos reciclados en mezclas asfálticas para pavimentos flexibles es una alternativa viable y sostenible, que puede contribuir significativamente a la reducción de la acumulación de residuos plásticos en la región.



4.2 Pruebas de laboratorio (Caracterización de los materiales).

Las pruebas de laboratorio son esenciales para caracterizar las propiedades de los materiales utilizados en las mezclas asfálticas especialmente cuando se incorporan los residuos plásticos. Estas pruebas nos permiten evaluar las resistencias, durabilidad y comportamiento de las mezclas bajo diversas condiciones específicas. En esta sección, se presentan los resultados de las pruebas de desgaste de los Ángeles y otros ensayos relevantes, proporcionando una comprensión integral de cómo los agregados y los residuos plásticos afectan las propiedades mecánicas y estructurales de las mezclas asfálticas. Estos datos son fundamentales para validar la viabilidad de utilizar plásticos reciclados en la construcción de pavimentos, con el objetivo de mejorar su desempeño y sostenibilidad.

4.2.1 Desgaste de los Ángeles (M-MMP-4-04-00/02).

La prueba de Desgaste de los Ángeles es crucial para evaluar la resistencia y durabilidad de los agregados utilizados en las mezclas asfálticas. Este ensayo mide la resistencia de los agregados a la abrasión e impacto, proporcionando un indicador de su capacidad para soportar las cargas de tráfico y las condiciones ambientales.

En base a la **Tabla 9** se pudo determinar el desgaste que llega a tener el material utilizado en este estudio, se usaron 11 esferas con una masa total de 4584 ± 25 g.

$$\text{Desgaste de Los Angeles (\%)} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso retenido}}{\text{Peso inicial}} \times 100$$

Donde se obtuvo:

Peso inicial = 4998 gr

Peso final = 2752 gr

$$\text{Desgaste de los angeles (\%)} = \left(\frac{4998 \text{ gr} - 2752 \text{ gr}}{4998 \text{ gr}} \right) \times 100\%$$

$$\text{Desgaste de los angeles (\%)} = 44.937 \% \approx 45 \%$$



Imagen 37. Resultado de prueba de desgaste de los ángeles.



Fuente: Elaboración propia

Este cálculo nos muestra que el desgaste por trituración de los materiales pétreos, medido mediante la prueba de los Ángeles, es aproximadamente 45%. Este resultado indica una resistencia moderada de los agregados a la abrasión, lo que es esencial para asegurar la durabilidad de los pavimentos en condiciones de tráfico intenso.

Los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio proporcionan una visión detallada sobre las propiedades mecánicas y estructurales de las mezclas asfálticas modificadas con residuos plásticos. Estas pruebas son fundamentales para evaluar la viabilidad de incorporar plásticos reciclados en la construcción de pavimentos, con el objetivo de mejorar su resistencia y durabilidad.

La siguiente sección presentará los resultados de las pruebas de desgaste de los Ángeles y otras pruebas de caracterización de los materiales, destacando su relevancia en el contexto de la investigación y su potencial aplicación en la construcción de carreteras más sostenibles y resistentes en Baja California.



4.2.2 Azul de Metileno (M-MMP-4-04-014/09).

La prueba de azul de metileno es utilizada para determinar la reactividad de los materiales finos (menores de 0.075 mm) en materiales pétreos para mezclas asfálticas. La reactividad se mide observando la cantidad de azul de metileno que los finos pueden absorber. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la prueba de azul de metileno para dos tipos de filler: filler tradicional del material cribado que pasa la malla 200 y carbonato de calcio (IMT, 2009).

Imagen 38. Resultado de prueba de Azul de metileno.



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la Prueba:

Interpretación Visual de la Imagen:

Gotas en el Papel de Filtro: Cada gota nos representa una muestra tomada después de la adición de una cantidad específica de solución de azul de metileno. La formación de un halo azul alrededor de las gotas indica el punto en el que los finos han absorbido todo el azul de metileno posible tal como se ve en la **Imagen 38. Resultado de prueba de Azul de metileno.**

Cálculo del Azul de Metileno:

Se utilizó la fórmula para calcular la cantidad de azul de metileno absorbida por los materiales finos:

$$AM = \frac{50 - C_{sol}}{W_f}$$



Donde:

AM es el azul de metileno (mg/g)

C sol es la cantidad de solución de trabajo en la bureta al terminar la prueba (mL)

W f es la masa de la porción de prueba (1 g)

Para el filler:

$$AM_{filler} = \frac{50 - 4}{1.001} = 46 \text{ mg/gr}$$

Para carbonato de calcio:

$$AM_{carbonato\ de\ calcio} = \frac{50 - 2}{0.999} = 48 \text{ mg/gr}$$

Esta clase de resultados nos muestran que el carbonato de calcio llega a absorber menos azul de metileno que el filler tradicional del agregado, lo que indica una menor presencia de materiales que afecten nuestras mezclas como la presencia de arcillas. Esto sugiere que el carbonato de calcio puede ofrecer una mejor adhesión en las mezclas asfálticas, mejorando potencialmente la durabilidad del pavimento. La menor cantidad de azul de metileno absorbido por el carbonato de calcio refleja una menor cantidad de arcillas, lo que es favorable para la calidad de las mezclas asfálticas.

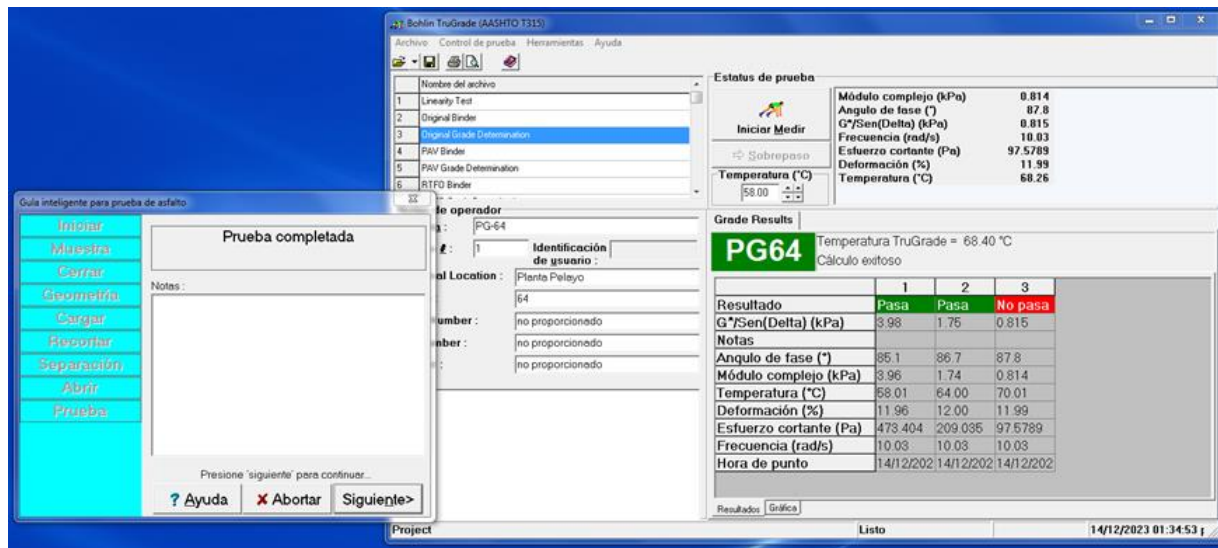
Este apartado presenta una clara comparación entre el filler tradicional y el carbonato de calcio, destacando la viabilidad de utilizar este último para mejorar las propiedades de las mezclas asfálticas, y sugiere que el carbonato de calcio puede ser una alternativa superior debido a su menor reactividad con el azul de metileno.

4.2.3 Modulo Geológico de Corte Dinámico (M-MMP-4-05-025/02).

La prueba de módulo reológico de corte dinámico se realizó utilizando el reómetro de corte dinámico (DSR) en muestras de asfalto, evaluando su comportamiento bajo esfuerzos de torsión cíclicos ([SCT, 2002](#)).



Imagen 39. Resultado del Módulo Geológico de Corte Dinámico.



Fuente: Elaboración propia

Resultados Obtenidos

Muestra PG64:

- Módulo Complejo (G^*): 8.14 kPa
- Ángulo de Fase (δ): 87.8°
- Esfuerzo Cortante: 0.22 kPa
- Temperatura de Prueba: 58.26°C

Los valores obtenidos indican que el asfalto PG64 cumple con los requisitos de calidad establecidos para módulos reológicos. El módulo complejo (G^*) y el ángulo fase (δ) proporcionan información crucial sobre la rigidez y la capacidad de deformación del asfalto bajo condiciones de carga cíclica. Un menor ángulo de fase indica una mayor elasticidad del material, mientras que un mayor módulo complejo sugiere una mayor resistencia a la deformación.

El módulo reológico de corte dinámico es una medida efectiva para evaluar las propiedades viscoelásticas de los asfaltos modificados. Los resultados obtenidos en esta prueba son cruciales para determinar la adecuación del asfalto en aplicaciones viales, asegurando su durabilidad y resistencia bajo condiciones de carga cíclica. La precisión y consistencia en la preparación y



ejecución de la prueba son esenciales para obtener resultados confiables y reproducibles.

4.3 Ensayos de pruebas de laboratorio (Mezclas asfálticas)

Este apartado presenta los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio realizados sobre las mezclas asfálticas preparadas y compactadas. Se incluyen tanto los resultados de la determinación de la gravedad específica bruta (G_{mb}) como otros parámetros relevantes, evaluando las propiedades mecánicas y volumétricas de las mezclas con y sin adiciones de HDPE. Estos ensayos permiten analizar el comportamiento y la calidad de las mezclas asfálticas bajo condiciones controladas, proporcionando datos cruciales para su aplicación en pavimentación.

4.3.1 MAC-I. Preparación y compactación de mezclas asfálticas en caliente por medio del compactador giratorio.

Los resultados de la preparación y compactación de las mezclas asfálticas utilizando el compactador giratorio revelaron diferencias significativas en el comportamiento de las mezclas dependiendo del contenido de HDPE.

- Mezclas Sin Plástico: Estas mezclas mostraron buena compactación y cohesión, manteniendo las propiedades esperadas de densidad y resistencia.
- Mezcla con 0.5% de HDPE: Se pudo compactar adecuadamente, mostrando una ligera mejora en la estabilidad y una reducción en los vacíos de aire.
- Mezcla con 0.62% de HDPE: Mostró una buena compactación, con mejoras notables en la durabilidad y estabilidad de la mezcla. Este contenido de HDPE resultó ser óptimo para la compactación sin comprometer la integridad de la mezcla.
- Mezclas con 1%, 4%, y 5% de HDPE: No lograron compactarse adecuadamente. La mezcla con 1% presentó problemas de cohesión y se desmoronó después de cierto tiempo, mientras que las mezclas con 4% y 5% no se compactaron en absoluto debido a la alta cantidad de plástico que afectó negativamente la cohesión de la mezcla.

Análisis de Granulometría y Contenido de Asfalto



El análisis de granulometría y el contenido de asfalto son fundamentales para entender el comportamiento de las mezclas asfálticas. La **Tabla 12**, muestra la granulometría de la mezcla tradicional y la **Tabla 13**, muestra la granulometría del trabajo a remplazar por porcentajes específicos de residuos plásticos de HDPE triturado, teniendo en cuenta los resultados de la **Tabla 8**, granulometría para la rueda de Hamburgo y el contenido óptimo de asfalto para este trabajo fue de 5.2% para todas las mezclas trabajadas.

Tabla 12. Granulometría Mezcla asfáltica Sin Plástico.

Malla	Gmb	Gmm	Rueda de Hamburgo
	Masa (gr)	Masa (gr)	Masa (gr)
1 1/2"	0.0	0.0	0.0
1"	0.0	0.0	0.0
3/4"	301.5	167.5	151.4
1/2"	436.5	242.5	219.2
3/8"	558.0	310.0	280.3
Nº4	1269.0	705.0	637.4
Nº8	472.5	262.5	237.3
Nº16	364.5	202.5	183.1
Nº30	288.0	160.0	144.7
Nº50	279.0	155.0	140.1
Nº100	216.0	120.0	108.5
Nº200	130.5	72.5	65.5
Pasa 200	184.5	102.5	92.7
Sumatoria	4500.0	2500.0	2260.2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Granulometría Mezcla asfáltica con porcentajes de HDPE.

Malla	Gmb	Gmm	Rueda de Hamburgo
	Masa (gr)	Masa (gr)	Masa (gr)
1 1/2"	0.0	0.0	0.0
1"	0.0	0.0	0.0
3/4"	301.5	167.5	159.1
1/2"	436.5	242.5	230.3
3/8"	558.0	310.0	294.4
Nº4	1269.0	705.0	669.5
Nº8	472.5	262.5	249.3
Nº16	364.5	202.5	192.3
Nº30	288.0	160.0	151.9
Nº50	279.0	155.0	147.2
Nº100	216.0	120.0	114.0
Nº200	130.5	72.5	68.8
Pasa 200	184.5	102.5	97.3
Sumatoria	4500.0	2500.0	2374.1

Fuente: Elaboración propia



Imagen 40. Mezclas asfálticas sin compactar.



Fuente: Elaboración propia

Registro de Resultados de Compactación

El grado de compactación se evaluó midiendo la gravedad específica bruta (G_{mb}) y la gravedad específica teórica máxima (G_{mm}). Las muestras con 0.62% y 0.5% de HDPE mostraron un buen grado de compactación con los valores de G_{mb} y G_{mm} dentro de los rangos aceptables, por otro lado las mezclas con altos porcentajes no se compactan de forma adecuada y afectan los resultados de compactación esto debido al efecto de rebote que puede estar generando el plástico al ser calentado en altas cantidades de remplazo tal como se ve en la **Imagen 30. Mezcla asfáltica sin compactar.**

Imagen 41. Mezclas asfálticas compactada adecuadamente.



Fuente: Elaboración propia

Estas imágenes y datos proporcionan una visión clara del proceso y resultados de la compactación



de mezclas asfálticas con y sin HDPE, resaltando la importancia del contenido de plástico en la integridad y durabilidad de las mezclas.

Evaluación de Resultados

Los resultados mostraron que las mezclas con altos porcentajes de HDPE (4% y 5%) no se compactaron adecuadamente, sugiriendo que cantidades excesivas de plástico interfieren con la cohesión de la mezcla. En contraste, la mezcla con 0.62% y el 0.5% de HDPE mostraron una buena compactación, lo que indica que este porcentaje es más adecuado para su uso en pavimentos flexibles. Además, se observó que la mezcla con 1% de HDPE, aunque mostró cierta mejora en la compactación, aún presentaba problemas de cohesión, lo que llevó a su descarte para ensayos posteriores.

A continuación en la **Tabla 14**, se presentan los resultados obtenidos para las diferentes mezclas:

Tabla 14. Tabla de resultados de compactación de mezclas asfálticas.

Mezcla	Compactabilidad	Observaciones
Sin Plástico	Buena	Mezcla cohesiva y estable
0.5% HDPE	Buena	Mejora en estabilidad, reducción de vacíos
0.62% HDPE	Excelente	Mejor compactación, durabilidad mejorada
1% HDPE	Regular	Problemas de cohesión, descartada
4% HDPE	Mala	No se compacta, efecto de rebote
5% HDPE	Mala	No se compacta, efecto de rebote

Fuente: Elaboración propia

4.3.2 MAC-II. Gravedad específica bruta (Gmb).

La determinación de la gravedad específica bruta (Gmb) de las mezclas asfálticas compactadas fue crucial para evaluar su calidad y rendimiento. Esta sección presenta los resultados obtenidos del análisis de gravedad específica bruta de las mezclas asfálticas preparadas y compactadas siguiendo los métodos descritos anteriormente.

Procedimiento y Equipos Utilizados:

El procedimiento comenzó con la preparación de especímenes de mezcla asfáltica compactada, los cuales fueron seleccionados de las muestras preparadas como se mencionó anteriormente. Estos especímenes incluyeron las mezclas sin plástico y mezclas con diferentes porcentajes de HDPE (0.5%, 0.62%, 1%, 4%, y 5%).



Una vez compactados, los especímenes de mezclas asfálticas tradicionales, con 0.5% y 0.6% de plástico fueron enfriados a temperatura ambiente para estabilizar sus propiedades físicas antes de proceder con la prueba de gravedad específica bruta. Este enfriamiento es esencial para garantizar que los resultados no sean afectados por variaciones de temperatura que puedan alterar la densidad y la cohesión de la mezcla.

Para la determinación de la gravedad específica bruta (G_{mb}), se utilizó una balanza de precisión para medir el peso seco (al aire) de cada espécimen. Luego, los especímenes fueron sumergidos en agua durante un período específico para asegurar la saturación completa. Este paso es crucial ya que la absorción de agua puede influir significativamente en la medición de la densidad. Después de la saturación, se determinó el peso sumergido de cada espécimen utilizando la misma balanza de precisión, asegurando que todas las mediciones fueran consistentes y precisas.

Con estos datos, se procedió a calcular la gravedad específica bruta (G_{mb}) y la absorción de agua utilizando las fórmulas:

Gravedad específica bruta (G_{mb}):

$$G_{mb} = \frac{A}{B - C}$$

Porcentaje de absorción de agua:

$$\text{Absorción de Agua (\%)} = \left(\frac{B - A}{B - C} \right) \times 100$$

Resultados Obtenidos

Los resultados obtenidos de la compactación y la determinación de la gravedad específica bruta para las mezclas asfálticas con diferentes porcentajes de HDPE fueron los siguientes:



Tabla 15. Resultados Gmb, Absorción de agua.

Mezcla	Masa Seca (A) [gr]	Masa Saturada (B) [gr]	Masa Sumergida (C) [gr]	Gravedad Específica Bruta (Gmb)	Absorción de Agua [%]
Sin Plástico	4406.01	4455.1	2521.102	2.386	2.526
0.5% HDPE	4407.5	4456.710	2522.503	2.380	2.542
0.62% HDPE	4410	4459.9	2525.9	2.375	2.576
1% HDPE	No estable	No estable	No estable	No estable	No estable
4% HDPE	No Compacta	No Compacta	No Compacta	No Compacta	No Compacta
5% HDPE	No Compacta	No Compacta	No Compacta	No Compacta	No Compacta

Fuente: Elaboración propia

Análisis de Resultados

- **Mezcla sin Plástico:** Mostró un buen comportamiento con una gravedad específica bruta de 2.386 y una absorción de agua de 2.526%.
- **0.5% HDPE:** Tuvo una gravedad específica bruta de 2.380 y una absorción de agua de 2.542%, indicando una ligera disminución en la densidad comparada con la mezcla sin plástico.
- **0.62% HDPE:** Presentó una gravedad específica bruta de 2.375 y una absorción de agua de 2.58% mostrando un incremento en la absorción de agua en comparación con la mezcla sin plástico.
- **1% HDPE:** Mostro problemas de cohesión y compactibilidad, aunque tubo mejoras a diferencia de las muestras con el 4 y 5% de remplazo.
- **4% y 5% HDPE:** No lograron compactarse adecuadamente, resultando en la imposibilidad de medir la gravedad específica bruta y sugiriendo que cantidades excesivas de plástico interfieren significativamente con la cohesión de la mezcla.

Los resultados indican que las mezclas asfálticas sin plástico y con bajos porcentajes de HDPE (0.5% y 0.62%) lograron una adecuada compactación y mostraron valores de gravedad específica y vacíos dentro de los rangos aceptables. Sin embargo, las mezclas con 1% de HDPE presentaron problemas de cohesión y no lograron compactarse adecuadamente. Las mezclas con 4% y 5% de HDPE no se compactaron en absoluto, indicando que cantidades excesivas de plástico afectan negativamente la cohesión de la mezcla.



Este ensayo es crucial para asegurar que las mezclas asfálticas compactadas cumplan con las especificaciones técnicas necesarias para garantizar su rendimiento y durabilidad en aplicaciones de pavimentación. La correcta determinación de la gravedad específica bruta permite evaluar la compacidad de la mezcla y predecir su comportamiento bajo condiciones de servicio.

4.3.3 MAC-III. Gravedad específica teórica máxima (Gmm).

La gravedad específica teórica máxima (Gmm) es un parámetro esencial para la evaluación de la calidad de las mezclas asfálticas, ya que permite determinar la densidad teórica máxima que puede alcanzar la mezcla sin considerar los vacíos de aire. Este apartado presenta los resultados obtenidos para Gmm de las mezclas asfálticas con diferentes porcentajes de HDPE y sin plástico.

Procedimiento:

Para determinar la gravedad específica teórica máxima (Gmm), se utilizaron las mezclas preparadas anteriormente, se emplearon mezclas de 2500 gr para cada ensayo. En la **Tabla 16**. Resultados de Gmm.

$$G_{mm} = \frac{A}{A - (C - B)}$$

Tabla 16. Resultados de Gmm.

Mezcla	Masa Seca (A) [gr]	Masa Sumergida (B) [gr]	Masa Picnómetro y Muestra Sumergida (C) [gr]	Gravedad Específica Teórica Máxima (Gmm)
Sin Plástico	2553.75	886.34	2409	2.477
0.5% HDPE	2584.10	886.65	2409	2.430
0.62% HDPE	2584.10	886.65	2409	2.434
1% HDPE	Material flotó	Material flotó	Material flotó	Material flotó
4% HDPE	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
5% HDPE	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica

Fuente: Elaboración propia



Análisis de Resultados:

Los resultados obtenidos de la gravedad específica teórica máxima para diferentes porcentajes de HDPE y sin plástico fueron los siguientes:

- Mezcla sin Plástico: Obtuvo una Gmm de 2.477, indicando una buena densidad teórica, este valor nos indica que la mezcla tiene una alta capacidad para alcanzar una densidad adecuada, lo que es indicativo de buena durabilidad y resistencia al tráfico.
- 0.5% HDPE: El valor de Gmm fue de 2.430, mostrando una ligera disminución en la densidad comparada con la mezcla sin plástico. A pesar de esta disminución, la mezcla sigue siendo adecuada para aplicaciones de pavimentación, manteniendo una buena densidad teórica.
- 0.62% HDPE: El valor de Gmm fue de 2.434, mostrando una buena densidad teórica cercana a la del 0.5%, esto indica que este porcentaje de HDPE es viable para su uso en mezclas asfálticas, manteniendo propiedades adecuadas para pavimentación.
- 1% HDPE: No se pudo realizar la prueba ya que el material flotó, indicando problemas de cohesión. Este resultado nos sugiere que este porcentaje de HDPE no es adecuado para mezclas asfálticas debido a su interferencia con la cohesión del material.
- 4% y 5% HDPE: No se pudieron realizar las pruebas ya que las mezclas no se compactaron adecuadamente. Estos resultados indican que cantidades excesivas de HDPE afectan negativamente la cohesión y compactibilidad de la mezcla, haciendo inviable su uso en estas proporciones.

Los resultados muestran que las mezclas asfálticas sin plástico y con bajos porcentajes de HDPE (0.5% y 0.62%) mantienen una buena densidad teórica, sugiriendo que son adecuadas para aplicaciones de pavimentación. Sin embargo, las mezclas con porcentajes más altos de HDPE (1%, 4%, y 5%) presentan problemas significativos de cohesión y compactibilidad, lo que las hace inviables para su uso en pavimentos. Por lo tanto, se recomienda el uso de hasta 0.62% de HDPE en mezclas asfálticas para asegurar una buena densidad y rendimiento del pavimento.



4.3.4 Porcentaje de vacíos.

El porcentaje de vacíos en una mezcla asfáltica es un parámetro crucial para evaluar su durabilidad y comportamiento bajo carga. Este valor se calcula mediante la diferencia entre la gravedad específica máxima teórica (G_{mm}) y la gravedad específica bruta (G_{mb}). La fórmula para calcular el porcentaje de vacíos (V_a) es la siguiente:

$$\%V_a = \left(\frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right) \times 100$$

Para obtener estos valores, se utilizaron los datos de masa seca, masa saturada y masa sumergida de los especímenes, como se muestran en las tablas previas de resultados. Se realizaron las pruebas siguiendo los métodos MAC-II y MAC-III descritos anteriormente, asegurando consistencia y precisión en las mediciones.

Los resultados obtenidos para el porcentaje de vacíos en las mezclas asfálticas con diferentes porcentajes de HDPE se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 15. Resultados $\%V_a$.

Mezcla	G_{mm}	G_{mb}	V_a (%)
Sin Plástico	2.477	2.386	3.68
0.5% HDPE	2.430	2.380	2.06
0.62% HDPE	2.434	2.375	2.42
1% HDPE	Material flotó	No aplica	No se pudo calcular
4% HDPE	No aplica	No aplica	No aplica
5% HDPE	No aplica	No aplica	No aplica

Fuente: Elaboración propia

Análisis de Resultados:

- Mezcla sin Plástico: Obtuvo un porcentaje de vacíos del 3.68%, lo que indica una buena densidad y una estructura compacta, sugiriendo que la mezcla puede soportar bien las cargas del tráfico y ofrecer una buena durabilidad.
- 0.5% HDPE: Presentó un porcentaje de vacíos de 2.06%, mostrando una ligera disminución en comparación con la mezcla sin plástico. Este resultado es favorable, ya que sugiere una



buena compactación y una potencial mejora en las propiedades mecánicas de la mezcla.

- 0.62% HDPE: Obtuvo un porcentaje de vacíos del 2.42%, similar al de la mezcla con 0.5% de HDPE. Este valor es indicativo de una buena compactación, sugiriendo que este porcentaje de HDPE también es adecuado para su uso en mezclas asfálticas.
- 1% HDPE: No se pudo realizar la prueba debido a que el material flotó durante el proceso de medición, lo cual indica problemas de cohesión en la mezcla y sugiere que este porcentaje de HDPE no es adecuado para mezclas asfálticas.
- 4% y 5% HDPE: No se pudieron realizar las pruebas debido a la falta de compactibilidad de las mezclas. Estos resultados indican que cantidades excesivas de HDPE interfieren negativamente con la cohesión de la mezcla, haciendo inviable su uso en estas proporciones.

En conclusión, las mezclas con bajos porcentajes de HDPE (0.5% y 0.62%) muestran buenos resultados en términos de porcentaje de vacíos, manteniendo una estructura compacta y estable. Por otro lado, los porcentajes más altos de HDPE presentan problemas significativos de cohesión y compactibilidad, lo que limita su aplicación en mezclas asfálticas.

4.3.5 MAC-V. Rueda Cargada de Hamburgo.

La prueba de la Rueda Cargada de Hamburgo es una metodología estandarizada utilizada para evaluar la resistencia a la deformación permanente y la susceptibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas. Este ensayo es fundamental para determinar la durabilidad y el rendimiento de las mezclas en condiciones de tráfico y ambiente húmedo.

Procedimiento:

Para realizar esta prueba, se utilizaron 4 muestras de mezclas asfálticas: 2 sin plástico y 2 con 0.62% de HDPE usadas como escamas. Las pastillas se sometieron a 20,000 ciclos de carga mediante una rueda cargada que simula las condiciones de tráfico pesado. La profundidad de la rodadura se midió a intervalos regulares para evaluar la deformación de las mezclas.

La información se recopiló y procesó con el software específico del equipo de la Rueda Cargada de Hamburgo, que proporciona datos detallados sobre la deformación a lo largo de los ciclos.



Preparación de Especímenes:

- **Selección y Preparación de Muestras:** Las muestras se compactaron utilizando un compactador giratorio para obtener especímenes de 150 mm de diámetro y 60 mm de espesor, según las granulometrías mencionadas en las **Tabla 12** y la **Tabla 13** para la implementación de la rueda de Hamburgo, donde se realizaron las mezclas asfálticas sin plástico y mezclas asfálticas con 0.62% de remplazo de HDPE, debido a las características que se obtuvieron y resultados de las pruebas anteriores.
- **Compactación:** Las muestras fueron compactadas hasta alcanzar la densidad deseada siguiendo el protocolo especificado y con alturas de 6 cm.

Configuración de la Prueba:

- **Equipo:** Se utilizó la Rueda Cargada de Hamburgo configurada para aplicar una carga de 705 N (158.6 lbf) a una temperatura controlada de 50°C.
- **Inmersión en Agua:** Los especímenes fueron sumergidos en agua a 50°C durante la prueba.
- **Número de Ciclos:** Se aplicaron 20,000 ciclos de carga sobre los especímenes para evaluar su resistencia a la deformación y el daño por humedad.

Registro de Datos:

- **Profundidad de Rodera:** Se registró la profundidad de la rodera a intervalos específicos de ciclos de carga.
- **Pendiente de la Zona Secundaria:** Se analizó la pendiente de la zona secundaria en la gráfica de profundidad de rodera para evaluar la tasa de deformación acumulada.



Imagen 42. Montaje de Rueda de Hamburgo



Fuente: Elaboración propia

Resultados:

Tabla 17. Registro de resultados de Rueda Cargada de Hamburgo.

Identificación de la muestra	Mezcla sin Plástico	Mezcla con 0.62% HDPE	
Tipo de espécimen	Cilíndrico	Cilíndrico	
Dimensiones del espécimen	150 mm diámetro, 60 mm espesor	150 mm diámetro, 60 mm espesor	
Temperatura de ensayo	50°C	50°C	
Número de pasadas máx.	20,000	20,000	
RESULTADOS	Rueda 1	Rueda 2	
		M.1	M.2
Gmb) Gravedad específica bruta	2.386	2.375	2.375
(Gmm) Gravedad específica teórica máxima	2.477	2.434	2.434
(Va) Contenido de vacíos [%]	7	7	7
Profundidad máxima de rodera	- 10	- 10	- 10
No. Pasadas en punto de inflexión.	5700	N/A	5800
No. Pasadas a deformación máxima.	8600	N/A	6300
Deformación máxima (mm)	- 11.73	- 25.73	-16.54
Numero máxima de pasadas	15192	11608	11608

Fuente: Elaboración propia

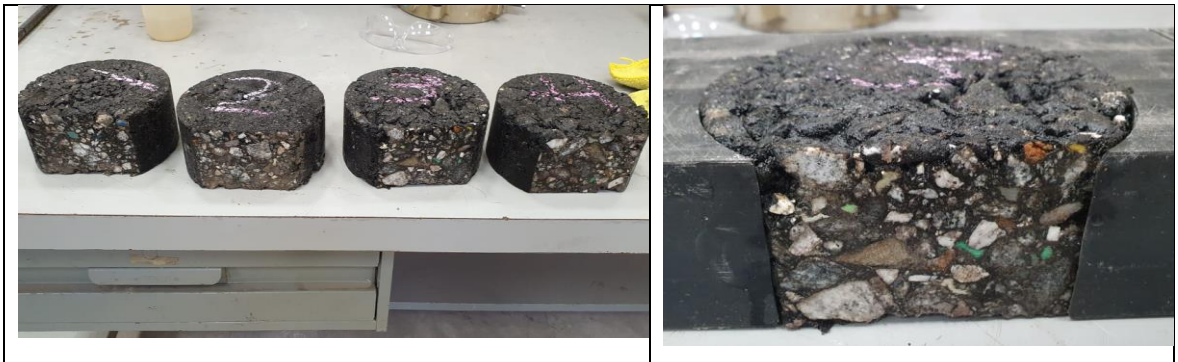


Imagen 43. Funcionamiento de Rueda de Hamburgo.



Fuente: Elaboración propia

Imagen 44. Pastillas antes de deformación.



Fuente: Elaboración propia

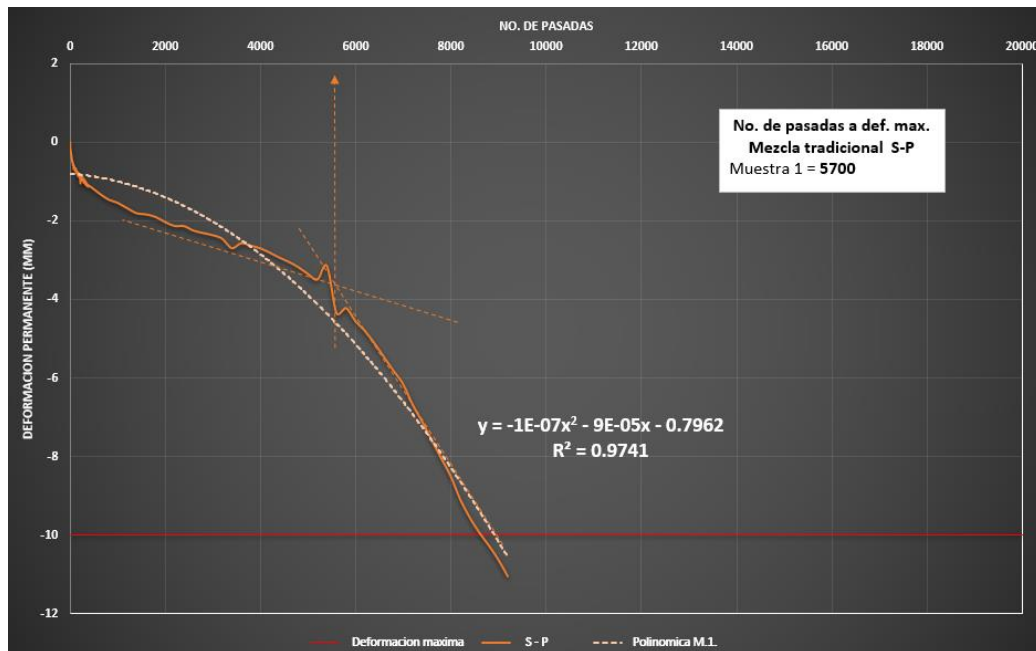


Imagen 45. Pastillas después de deformación.



Fuente: Elaboración propia

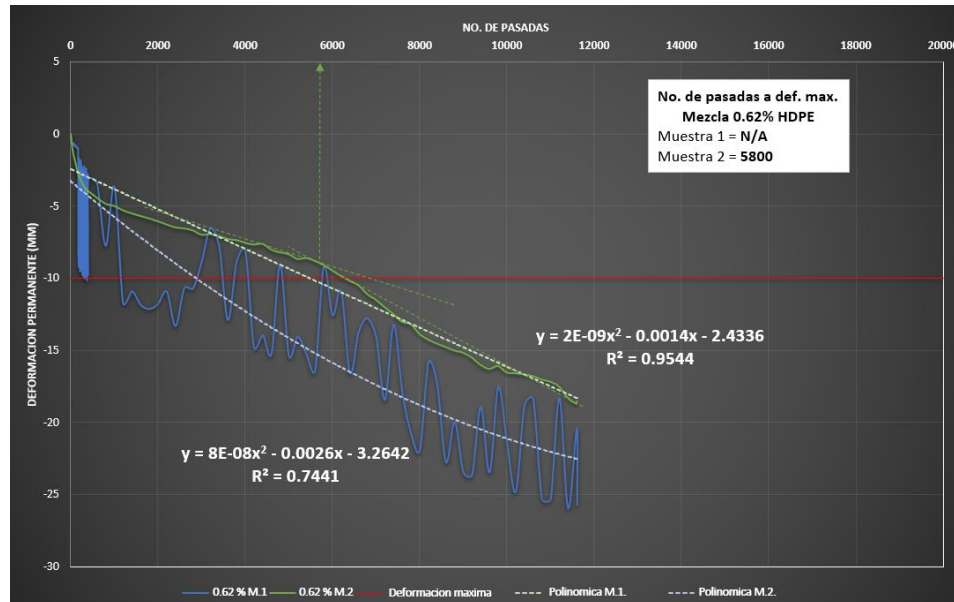
Imagen 46. Gráfico de resultado de Mezcla asfáltica sin plástico con nivel de confianza.



Fuente: Elaboración propia



Imagen 47. Gráfico de resultado de Mezcla asfáltica 0.62% HDPE con nivel de confianza.



Fuente: Elaboración propia

Imagen 48. Comparativa de graficas de resultados de ruedas de Hamburgo.



Fuente: Elaboración propia



Análisis de Resultados

En la **Imagen 46**, se puede ver el gráfico del resultado de las mezclas asfálticas tradicionales en las ruedas de Hamburgo, este resultado representa la deformación permanente de la mezcla. La deformación máxima se alcanza a las 5700 pasadas, con la deformación llegando a los 10 mm. La línea naranja nos indica como la mezcla tradicional sin aditivos ni porcentajes de remplazos se deforma de manera consistente hasta alcanzar la deformación máxima. La ecuación de la línea de tendencia y el $R^2 = 0.9741$ nos indican una buena correlación, lo que refleja una predicción confiable de la deformación.

Por otro lado, en la **Imagen 47**, se muestran las líneas azul y verde representando las mezclas asfálticas con 0.62% de HDPE de remplazo en su estructura para la prueba de la Rueda de Hamburgo. La línea azul (Muestra 1) muestra una gran distorsión en los resultados y un nivel de confianza bajo ($R^2 = 0.7441$), lo que sugiere que no se puede determinar de manera confiable la deformación máxima de esta mezcla. Esto puede deberse al efecto de rebote del plástico, donde el HDPE se derrite parcialmente y solo queda una fracción de este material sólido, mientras que otra fracción de agregado plástico no, generando así una mala cohesión de los materiales y una inflación en el plástico, causando así inestabilidad en el pavimento.

Por otro lado, la línea verde (Muestra 2) tiene un mejor nivel de confianza ($R^2 = 0.9453$), permitiendo determinar la deformación máxima a las 5800 pasadas. Esto sugiere que el plástico se derritió en una gran fracción, de esta manera envolviendo el agregado y actuando de manera más similar a un ligante asfáltico, a pesar de que la investigación no tiene como objetivo principal este resultado da entrada a nuevas opciones y futuros estudios.

Finalmente, en la **Imagen 48** se comparan las tres mezclas: Tradicional sin plástico (naranja), HDPE 0.62% Muestra 1 (azul) y HDPE 0.62% Muestra 2 (verde). La mezcla sin aditivos alcanza la deformación máxima a 5700 pasadas. La Muestra 1 con HDPE no muestra una deformación confiable debido al efecto de rebote del plástico. La Muestra 2 con HDPE muestra una deformación máxima a 5800 pasadas, sugiriendo una mejor integración del plástico como ligante.

En resumen, la gráfica y los resultados indican que la mezcla tradicional sin HDPE es más resistente en términos de deformación permanente comparada con las mezclas modificadas con HDPE, aunque las mezclas con HDPE pueden presentar ciertas mejoras en la compactibilidad y reducción de vacíos.



4.5 Comparación de los resultados

La **Tabla 18**, muestra un resume de los resultados obtenidos de las pruebas realizadas con mezclas asfálticas, tanto con y sin adición de HDPE, en términos de compactibilidad, propiedades físicas y desempeño bajo la prueba de la Rueda Cargada de Hamburgo. Los resultados muestran que la mezcla con 0.62% de HDPE presentan la mejor combinación de compactibilidad y resistencia a la deformación permanente. Las mezclas con HDPE mostraron una menor profundidad de rodadura comparadas con la mezcla sin plástico.

La tabla resume los resultados de las pruebas de ruedas de Hamburgo para las mezclas sin plástico y con 0.62% HDPE. Se observa que la mezcla sin plástico talcanza una profundidad máxima de rodadura de - 10 mm a las 8600 pasadas y alcanza 5700 pasadas en su punto de inflexión, mientras que las mezcla con 0.62% de HDPE dando a entender que la deformación máxima de esta mezcla también es mayor que la de la mezcla sin HDPE, pero menor que la de la Muestra 1, alcanzando - 10 mm a las 6300 pasadas, además que su punto de inflexión se encuentra a las 5800 pasadas, mostrando una mejor integración del HDPE en comparación con la Muestra 1.

Esto sugiere que, aunque la mezcla con HDPE muestra una resistencia mejorada a la deformación inicial, la mezcla tradicional sin HDPE sigue siendo más resistente a la deformación permanente bajo cargas repetitivas, alcanzando una mayor cantidad de pasadas antes de una deformación significativa.



Tabla 18. Comparación de resultados.

Mezcla	Compac.	Observaciones	Masa Seca (A) [gr]	Masa Saturada (B) [gr]	Masa Sumergida (C) [gr]	Gravedad Específica Bruta (Gmb)	Absorción de Agua [%]	Gravedad Específica Teórica Máxima (Gmm)	Contenido de Vacíos [%]	Número máximas de pasadas en Ruda de Hamburgo	Numero de pasadas a deformación máxima.	Numero de pasadas en punto de inflexión.	Deformación Total. (mm)
Sin Plástico	Buena	Mezcla cohesiva y estable	4406.01	4455.1	2521.102	2.386	2.526	2.477	3.68	15192	8600	5700	- 11.73
0.5% HDPE	Buena	Mejora en estabilidad, reducción de vacíos	4407.5	4456.710	2522.503	2.380	2.542	2.430	2.06	N-A	N-A	N-A	N-A
0.62% HDPE	Excelente	Mejor compactación, durabilidad mejorada	4410.0	4459.9	2525.9	2.375	2.576	2.434	2.42	11608	6300	5800	- 25.73
										11608	N-A	N-A	- 16.54
1% HDPE	Regular	Problemas de cohesión, descartada	N-A	N-A	N-A	N-A	N-A	N-A	N-A	N-A	N-A	N-A	N-A
4% HDPE	Mala	No se compacta, efecto de rebote	N-A	N-A	N-A	N-A	N-A	N-A	N-A	N-A	N-A	N-A	N-A
5% HDPE	Mala	No se compacta, efecto de rebote	N-A	N-A	N-A	N-A	N-A	N-A	N-A	N-A	N-A	N-A	N-A

Fuente: Elaboración propia



Análisis de Resultados

Los resultados obtenidos de la prueba de la Rueda Cargada de Hamburgo muestran una clara diferencia en el comportamiento de las mezclas asfálticas con y sin la adición de HDPE. A continuación, se presentan las observaciones clave:

1. Mezcla Sin Plástico:

- **Compactación y Observaciones:** La mezcla sin plástico presentó una compactación correcta, con una mezcla cohesiva y estable.
- **Propiedades Físicas:**
 - Gravedad específica bruta (Gmb): 2.386
 - Gravedad específica teórica máxima (Gmm): 2.477
 - Contenido de vacíos (Va): 7%
- **Resultados de la Prueba:**
 - Profundidad máxima de rodadura: -10 mm
 - No. de pasadas en punto de inflexión: 5700
 - No. de pasadas a deformación máxima: 8600
 - Deformación máxima total: -11.73 mm
 - Número máximo de pasadas: 15192

Mezcla con 0.62% HDPE (Muestra 1 - M1):

- **Compactación y Observaciones:** Presentó una buena compactabilidad.
 - Propiedades Físicas:
 - Gravedad específica bruta (Gmb): 2.375
 - Gravedad específica teórica máxima (Gmm): 2.434
 - Contenido de vacíos (Va): 7%
- **Resultados de la Prueba:**
 - Profundidad máxima de rodadura: -10 mm
 - No. de pasadas en punto de inflexión: N/A
 - No. de pasadas a deformación máxima: N/A
 - Deformación máxima total: -25.73 mm
 - Número máximo de pasadas: 11608

Mezcla con 0.62% HDPE (Muestra 2 - M2):



- **Compactación y Observaciones:** Presentó una excelente compactabilidad, mejorando la durabilidad.
 - Propiedades Físicas:
 - Gravedad específica bruta (Gmb): 2.375
 - Gravedad específica teórica máxima (Gmm): 2.434
 - Contenido de vacíos (Va): 7%
- **Resultados de la Prueba:**
 - Profundidad máxima de rodadura: -10 mm
 - No. de pasadas en punto de inflexión: 5800
 - No. de pasadas a deformación máxima: 6300
 - Deformación máxima total: -16.54 mm
 - Número máximo de pasadas: 11608

Mezcla con 1% HDPE y Superiores:

A medida que se incrementa el contenido de HDPE, se observan problemas de cohesión y efectos de rebote, lo que lleva a la conclusión de que estos porcentajes no son adecuados para la mezcla asfáltica.

Las observaciones principales son las siguientes:

- **Mezcla Sin Plástico:** Aunque presenta una buena compactación y estabilidad su deformación máxima bajo condiciones de carga repetitiva es menor comparada con las mezclas modificadas con HDPE, alcanzando -10 mm a las 8600 pasadas.
- **Mezcla con 0.5% HDPE:** Mejoras notables en la estabilidad y reducción de vacíos se observaron, con una menor deformación en comparación con la mezcla sin plástico.
- **Mezcla con 0.62% HDPE:** Mostró el mejor desempeño de las mezclas con plástico, con una excelente compactación y una durabilidad mejorada. Alcanzó una deformación máxima de -10 mm a las 6300 pasadas y una deformación máxima total de -25.73 mm, lo cual sugiere una mayor resistencia a la deformación permanente.
- **Mezcla con 1% HDPE y superiores:** A medida que se incrementa el contenido de HDPE, se observan problemas de cohesión y efectos de rebote, lo que lleva a la conclusión de que estos porcentajes no son adecuados para la mezcla asfáltica.



4.6 Propuestas para reducción de residuos plásticos en baja california.

La creciente acumulación de residuos plásticos es un desafío ambiental significativo que afecta a Baja California, al igual que muchas otras regiones del mundo. La gestión inadecuada de estos residuos contribuye a la contaminación de suelos, ríos y océanos, afectando tanto a los ecosistemas naturales como a la salud humana. Ante esta problemática, se presentan varias propuestas para la reducción efectiva de residuos plásticos en Baja California.

Para reducir los residuos plásticos en Baja California, se proponen las siguientes estrategias:

1. **Implementación de Programas de Reciclaje:** Fortalecer los programas de recolección y reciclaje de plásticos, incentivando la participación ciudadana y empresarial.
2. **Incorporación en Infraestructuras:** Promover el uso de plásticos reciclados en proyectos de infraestructura vial, basándose en los resultados positivos obtenidos en esta investigación.
3. **Investigación y Desarrollo:** Fomentar la investigación continua sobre nuevas aplicaciones de residuos plásticos en la construcción y otros sectores.
4. **Educación y Concienciación:** Desarrollar campañas educativas para sensibilizar a la población sobre la importancia del reciclaje y el impacto positivo de la reutilización de plásticos en la construcción.
5. **Políticas y Regulaciones:** Implementar políticas y regulaciones que obliguen y faciliten la integración de materiales reciclados en proyectos públicos y privados.



V conclusiones.

Al concluir esta investigación, se puede afirmar que, se evaluó la viabilidad de utilizar residuos plásticos de HDPE en el diseño de mezclas asfálticas. Los resultados no respaldaron la hipótesis de que el HDPE mejoraría significativamente la resistencia a la deformación permanente en pavimentos. Los objetivos de explorar la integración de HDPE y abordar problemas de calidad de agregados y contaminación por residuos plásticos en Baja California fueron abordados a través de la metodología y pruebas realizadas, pero los resultados indicaron que el HDPE no es un aditivo viable para este propósito.

5.1 Conclusiones teóricas.

La literatura sugiere que ciertos plásticos pueden mejorar algunas propiedades de las mezclas asfálticas, los resultados de esta investigación indican que el HDPE no es adecuado para este propósito. La variabilidad en el comportamiento del plástico durante la compactación y el efecto de rebote observado son factores limitantes significativos. Comparando con otros estudios, se observa que los tipos de plástico utilizados en otras investigaciones han mostrado mejores resultados, lo que sugiere que la elección del tipo de plástico es crucial.

La investigación teórica también subraya la importancia de considerar las propiedades físicas y químicas de los plásticos utilizados en mezclas asfálticas. Los plásticos con puntos de fusión más bajos y mayor consistencia en su comportamiento podrían ofrecer mejores resultados. Sin embargo, el HDPE, con su alto punto de fusión y comportamiento inconsistente, presenta desafíos significativos para su incorporación efectiva en mezclas asfálticas.

5.2 Conclusiones metodológicas.

Metodológicamente, la investigación reveló varias limitantes en el uso del HDPE en mezclas asfálticas. Las pruebas de laboratorio mostraron dificultades en la compactación y evaluación de la deformación permanente debido al comportamiento inconsistente del HDPE. Estas limitaciones indican la necesidad de un control más riguroso de las condiciones de mezcla y un mayor entendimiento del comportamiento del plástico bajo condiciones de carga repetida. Además, la metodología utilizada para incorporar el plástico necesita ajustes para asegurar una mejor distribución y cohesión del material en la mezcla.



Se concluye que futuras investigaciones deben enfocarse en mejorar los métodos de incorporación del plástico, posiblemente explorando tecnologías de mezcla más avanzadas o diferentes tipos de plásticos con propiedades más adecuadas para la integración en mezclas asfálticas. El desarrollo de técnicas que permitan una dispersión uniforme del plástico en la mezcla y la minimización de su efecto de rebote serán cruciales para mejorar los resultados.

5.3 Conclusiones de los resultados.

Los resultados de la investigación concluyen que el HDPE no mejora significativamente las propiedades de las mezclas asfálticas en términos de resistencia a la deformación permanente. Las mezclas con bajos porcentajes de HDPE mostraron una ligera mejora en estabilidad, pero no lo suficiente para superar las mezclas tradicionales. Las limitaciones de la investigación incluyen la dificultad en controlar la cohesión del plástico y su distribución en la mezcla. Para futuras investigaciones, se sugiere explorar otros tipos de plásticos y métodos de incorporación, así como estudios a largo plazo sobre el comportamiento de las mezclas bajo condiciones reales de tráfico y clima.

Además, es importante considerar la sostenibilidad y el impacto ambiental de utilizar residuos plásticos en mezclas asfálticas. Aunque el HDPE no demostró ser viable en esta investigación, la búsqueda de alternativas plásticas adecuadas podría ofrecer una solución dual a los problemas de pavimentación y gestión de residuos plásticos. Los resultados indican que, aunque el HDPE no es adecuado, la premisa de utilizar residuos plásticos en mezclas asfálticas sigue siendo una línea de investigación prometedora que requiere una selección cuidadosa de materiales y métodos.

En resumen, la hipótesis nula de que el HDPE no puede ser utilizado efectivamente en mezclas asfálticas para mejorar su resistencia a la deformación permanente queda aceptada. No obstante, la investigación abre la puerta a futuras exploraciones con diferentes tipos de plásticos y metodologías mejoradas que podrían superar las limitaciones encontradas en este estudio. La importancia de la innovación en la gestión de residuos plásticos y su potencial integración en materiales de construcción sostenible continúa siendo un área crucial de desarrollo.



VI. REFERENCIAS

1. Abduljabbar, N., Al-Busaltan, S., Dulaimi, A., Al-Yasari, R., Sadique, M., & Al Nageim, H. (2022) “The effect of waste low-density polyethylene on the mechanical properties of thin asphalt overlay”, *Construction and Building Materials* [Preprint]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125722>.
2. Akinleye, M. T., Jimoh, Y. A., & Salami, L.O. (2020) *Marshall properties evaluation of hot and warm asphalt mixes incorporating dissolved plastic bottle modified bitumen*, *JOURNAL OF MATERIALS AND ENGINEERING STRUCTURES*.
3. Alarcón, D., Chaparro, J. y Sánchez, M. (2020) “Importancia de la Resistencia y Vida Útil de Mezclas Asfálticas Modificadas con GCR en Colombia”, *file:///C:/Users/VERA/Downloads/ASKEP_AGREGAT_ANAK_and_REMAJA_PRINT.docx* [Preprint].
4. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2012) “Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR) (AASHTO T315-12).”
5. Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas (ASEFMA). (2022) *La producción de mezclas asfálticas aumenta en 2021, en un escenario de creciente inversión en mantenimiento de carreteras*.
6. Asociación Mexicana del Asfalto, A.C. (AMMAC) (2011) “Protocolo AMAAC PA-MA 01-2011: Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño.”
7. Asociación Mexicana del Asfalto, A.C. (AMMAC) (2018) *Protocolo AMAAC PA-MA 01-2011: Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño*.
8. Assefa, N. (2021) “Evaluation of the effect of recycled waste plastic bags on mechanical properties of hot mix asphalt mixtures for road construction”, *Sustainable Environment*, 7(1). Disponible en: <https://doi.org/10.1080/27658511.2021.1957649>.
9. Awad, A. y Al Adday, F. (2017) “Utilization of waste plastics to enhance the performance of modified hot mix asphalt”, *International Journal of GEOMATE* [Preprint]. Disponible en: <https://doi.org/10.21660/2017.40.170603>.
10. Ayala del Toro, Y., Delgado Alamilla, H., & SALAZAR RIVERA, A.Z. (2015) “Manual de ensayos para laboratorio: Mezclas asfálticas en caliente (MAC) - Parte 1: Para el cálculo de volumetría y ensayos de desempeño (Publicación Técnica No. 516) Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte.”
11. Ayala del Toro, Y., Delgado Alamilla, H., Cuéllar Pérez, V. H., & Salazar Rivera, A.Z. (2019) “Manual de ensayos para laboratorio. Agregados (AG) para mezclas asfálticas. Instituto Mexicano del Transporte.” Disponible en: <https://trid.trb.org/View/1607204>.
12. Biber, N. F., Foggo, A., & Thompson, R.C. (2019) “Characterising the deterioration of different plastics in air and seawater”, *Marine Pollution Bulletin*, 141. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.02.068>.
13. Cardone, F., Spadoni, S., Ferrotti, G., & Canestrari, F. (2022) “Asphalt mixture modification with a plastomeric compound containing recycled plastic: laboratory and field investigation”, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* [Preprint]. Disponible en: <https://doi.org/10.1617/s11527-022-01954-4>.
14. Casey, D., McNally, C., Gibney, A., & Gilchrist, M.D. (2008) “Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt”, *Resources, Conservation and Recycling*, 52(10), pp. 1167–1174. Disponible en:



- <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2008.06.002>.
15. Chalmin, P. (2019) "The history of plastics: from the Capitol to the Tarpeian Rock. Field actions science reports.", *The Journal of Field Actions, (Special Issue 19)*, 6-11. [Preprint].
 16. d'Ambrières, W. (2019) "Plastics recycling worldwide: current overview and desirable changes", <http://journals.openedition.org/factsreports> [Preprint], (Special Issue 19).
 17. D'Angelo, J., Bukowski, J., & Harman, T. (1999) "Superpave Asphalt Mixture Design Workshop Workbook.", *US Department of Transportation, Federal Highway Administration* [Preprint].
 18. D'Angelo, J., Bukowski, J., & Harman, T. (2021) "Superpave Asphalt Mixture Design Workshop Workbook.", *US Department of Transportation, Federal Highway Administration*, version. [Preprint]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124702>.
 19. Demirbaş, A. y Arin, G. (2002) "An overview of biomass pyrolysis", *Energy Sources* [Preprint]. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/00908310252889979>.
 20. Envaselia. (2018) *Tereftalato de polietileno: ¿Qué es?, Usos y Propiedades*. Disponible en: <https://www.envaselia.com/blog/tereftalato-de-polietileno-id12.htm>.
 21. Garnica Anguas, P., Delgado Alamilla, H., & Sandoval Sandoval, C.D. (2005) "Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas. Publicación técnica, (271)."
 22. Garnica Anguas, P., Delgado Alamilla, H., Gómez López, J. A., Romero, S. A., & Alarcón Orta, H.A. (2004) "Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas (Publicación Técnica No. 246). Instituto Mexicano del Transporte."
 23. Haider, S., Hafeez, I., & Ullah, R. (2020) "Sustainable use of waste plastic modifiers to strengthen the adhesion properties of asphalt mixtures. Construction and Building Materials, 235, 117496.", *Construction and Building Materials* [Preprint]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117496>.
 24. Harman, T., D'Angelo, J., & Bukowski, J. (1999) *Superpave Asphalt Mixture Design Workshop Workbook. US Department of Transportation Federal Highway Administration*.
 25. Hong, Z., Yan, K., Wang, M., You, L., & Ge, D. (2022) "Low-density polyethylene/ethylene-vinyl acetate compound modified asphalt: Optimal preparation process and high-temperature rheological properties", *Construction and Building Materials* [Preprint]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125688>.
 26. IMT, I.M. del T. (2002) "M-MMP-4-04-006-02: Procedimiento de prueba para determinar el contenido de asfalto en mezclas asfálticas utilizando el aparato de destilación.", en *MMP. Métodos de muestreo y prueba de materiales*, p. Parte 4: Materiales para pavimentos, Título 04: Ma.
 27. IMT, I.M. del T. (2005) "Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas (Publicación Técnica No. 267).", *Secretaría De Comunicaciones Y Transportes* [Preprint].
 28. IMT, I.M. del T. (2009) "N-CMT-4-05-001-05: Especificaciones generales para construcción de terracerías."
 29. Instituto de investigacion y planeacion urbana Mexicali, (IMIP) (2020) *Programa Municipal de Desarrollo Urbano Mexicali, Baja California*. Disponible en: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.mexicali.gob.mx/transparencia/administracion/programasfederales/PMDU2020.pdf>.
 30. Ismail, Z. Z., & Al-Hashmi, E.A. (2008) "Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement.", *Waste Management*, 28(11). Disponible en:



- <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.08.023>.
31. Jmal, H., Bahlouli, N., Wagner-Kocher, C., Leray, D., Ruch, F., Munsch, J. N., & Nardin, M. (2018) "Influence of the grade on the variability of the mechanical properties of polypropylene waste", *Waste Management*, 75, pp. 160–173. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2018.02.006>.
 32. Khoo, H.H. (2019) "LCA of plastic waste recovery into recycled materials, energy and fuels in Singapore", *Resources, Conservation and Recycling*, 145, pp. 67–77. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2019.02.010>.
 33. Leal Filho, W., Saari, U., Fedoruk, M., Iital, A., Moora, H., Klöga, M., & Voronova, V. (2019) "An overview of the problems posed by plastic products and the role of extended producer responsibility in Europe", *Journal of Cleaner Production*, 214. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.256>.
 34. López, C., Thenoux, G., Sandoval, G., Armijos, V., Ramírez, A., Guisado, F., & Moreno, E. (2017) "Estudio de mezclas asfálticas templadas con emulsión super-estabilizada", *Revista ingeniería de construcción* [Preprint]. Disponible en: <https://doi.org/10.4067/s0718-50732017000100006>.
 35. Ma, J., & Hesp, S.A. (2022) "Effect of recycled polyethylene terephthalate (PET) fiber on the fracture resistance of asphalt mixtures", *Construction and Building Materials* [Preprint]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127944>.
 36. Manfro, A. L., de Melo, J. V. S., Del Carpio, J. A. V., & Broering, W.B. (2022) "Permanent deformation performance under moisture effect of an asphalt mixture modified by calcium carbonate nanoparticles", *Construction and Building Materials*, 342, p. 128087. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.128087>.
 37. Marquez, K. P., Arizala, C. V. D., Soriano, V. J., Barron, J. M. G., Florece, A. E. A., Caday, J. H. B., & Migo, V.P. (2021) "Recycled polyethylene terephthalate as reinforcement additive of asphalt mixture for pavement application", *Philippine Journal of Science* [Preprint]. Disponible en: <https://doi.org/10.56899/150.03.39>.
 38. Martínez Lazcano, C.C. (2016) *Análisis de calidades de bancos pétreos para la elaboración de una base de datos que facilite los procesos de diseño de mezclas asfálticas del municipio de Mexicali, B.C.*
 39. Mazouz, M., & Merbouh, M. (2019) "The Effect of Low-Density Polyethylene Addition and Temperature on Creep-recovery Behavior of Hot Mix Asphalt", *Civil Engineering Journal (Iran)*, 5(3). Disponible en: <https://doi.org/10.28991/cej-2019-03091271>.
 40. McGennis, R. B., Anderson, M., Kennedy, T. W., & Solaimanian, M. (1996) "Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas de Superpave."
 41. Minaya S., O.. (2001) "METODO MARSHALL PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS ASTM", en *Manual de ensayos de laboratorio para pavimentos*.
 42. Moghaddam, T. B., Soltani, M., & Karim, M.R. (2014) "Evaluation of permanent deformation characteristics of unmodified and Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures using dynamic creep test", *Materials and Design* [Preprint]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.015>.
 43. Naeco. (2022) *Historia del plástico: origen y evolución*. Disponible en: <https://naeco.com/es/actualidad/historia-del-plastico/>.
 44. Napper, I. E., & Thompson, R.C. (2020) "Plastic debris in the marine environment: history and future challenges.", *Global Challenges*, 4(6), p. 1900081. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/GCH2.201900081>.



45. Nejad, F. M., Arabani, M., Hamed, G. H., & Azarhoosh, A.R. (2013) “Influence of using polymeric aggregate treatment on moisture damage in hot mix asphalt”, *Construction and Building Materials* [Preprint]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.060>.
46. ONNCCE. (2004) “Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2004: Industria de la construcción - Agregados - Determinación de la presencia de sustancias nocivas en los agregados pétreos - Método del azul de metileno. Organización Nacional de Normalización y Certificación de la Const”.
47. Perdomo, G.A. (2002) “Plásticos y medio ambiente. Revista iberoamericana polimeros”, *Revista Iberoamericana Polímeros* [Preprint].
48. Plastics Europe. (2023) *History of plastics • Plastics Europe*.
49. PLASTIVIDA (2007) “Degradación de los Materiales Plásticos”, *El plástico a favor de la vida* [Preprint].
50. Porot, L. (2008) “Mezclas asfálticas a más bajas temperaturas. XXXV Reunión del Asfalto. Rosario, Argentina: Comisión Permanente del Asfalto.”, en.
51. Raza, S. A., Shah, N., & Sharif, A. (2019) “Time frequency relationship between energy consumption, economic growth and environmental degradation in the United States: Evidence from transportation sector”, *Energy*, 173, pp. 706–720. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.01.077>.
52. Revelo, M. (2014) “Diseño de mezclas asfálticas en caliente modificadas con elastómero (caucho) y tereftalato de polietileno reciclados con ligante asfáltico AC-20. Universidad de las Fuerzas Armadas, Ecuador.”
53. Rojas, T. (2023) *Todo sobre el polietileno de alta densidad (HDPE): Usos, ventajas y mercado actual. Tecnología del Plástico*. Disponible en: <https://www.plastico.com/es/noticias/todo-sobre-el-polietileno-de-alta-densidad-hdpe-usos-ventajas-y-mercado-actual> (Consultado: el 30 de noviembre de 2023).
54. Sanz García, J.M. (2022) *Evolucion del diseño en firmas de carreteras y nuevos materiales en la era de la economia circular: un cambio de paradifma*.
55. SICT (2005) *CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES N·CMT·4·05·001/05*. Editado por 4. MATERIALES PARA PAVIMENTOS.
56. SICT Secretaria de Infraestructura Comunicaciones y Transporte (2009) “N.CMT.2.02.002/02 Caracteristicas de los materiales”.
57. Singh, B., Gupta, M., & Tarannum, H. (2003) “Mastic of polymer-modified bitumen and poly(vinyl chloride) wastes”, *Journal of Applied Polymer Science*, 90(5), pp. 1347–1356. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/APP.12795>.
58. Singh, P., & Swamy, A.K. (2019) “Effect of aging level on viscoelastic properties of asphalt binder containing waste polyethylene”, *International Journal of Sustainable Engineering* [Preprint]. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/19397038.2018.1474398>.
59. Sintac. (2022) *Propiedades del polietileno de baja densidad (PEBD), SINTAC Recycling*. Disponible en: <https://sintac.es/propiedades-del-polietileno-de-baja-densidad/> (Consultado: el 30 de noviembre de 2023).
60. Sukmawan, W., & Arifin, S. (2021) “Effect of Adding Plastic Waste Idpe (Low Density Polyethylene) and Pet (Polyethylene Terephthalate) on the Behaviour of Stability Marshall Characteristics of Asphalt Concrete Mixture”, *International Journal of Civil Engineering (IJCE)*, 10(2).
61. SyBridge Technologies. (2021) *Know Your Materials: Polystyrene (PS) - SyBridge*



- Technologies*. Disponible en: <https://sybridge.com/know-your-materials-polystyrene/> (Consultado: el 30 de noviembre de 2023).
62. Tania Rojo, Freddy A. Moquete, J.E.V. y M.G. (2016) *Historia del uso de asfalto*.
63. Ullah, S., Raheel, M., Khan, R., & Khan, M.T. (2021) “Characterization of physical & mechanical properties of asphalt concrete containing low- & high-density polyethylene waste as aggregates”. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124127>.
64. United Nations Development Program (UNDP) (2023) *El ABC de los plásticos Una guía sobre las negociaciones mundiales sobre plásticos*. Disponible en: [https://www.undp.org/es/el-abc-de-los-plasticos#:~:text=Se calcula que el mundo,más de 13.700 torres Eiffel](https://www.undp.org/es/el-abc-de-los-plasticos#:~:text=Se calcula que el mundo,más de 13.700 torres Eiffel.). (Consultado: el 29 de noviembre de 2023).
65. Walker, T. R., & Xanthos, D. (2018) “A call for Canada to move toward zero plastic waste by reducing and recycling single-use plastics”, *Resources, Conservation and Recycling*, 133, pp. 99–100. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2018.02.014>.
66. Wang, Z., Li, Y., Zhang, W., Zhang, D., Liu, S., Shi, S., & Li, C. (2021) “Study on Performance of Wax Warm Mix Asphalt Cracked by Mixed Polyethylene Waste Plastics”, *Scientific and Social Research* [Preprint]. Disponible en: <https://doi.org/10.36922/ssr.v3i4.1217>.
67. Wu, S., & Montalvo, L. (2021) “Repurposing waste plastics into cleaner asphalt pavement materials: A critical literature review”, *Journal of Cleaner Production*, 280, p. 124355. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.124355>.
68. Xing, X., Pei, J., Li, R., & Tan, X. (2019) “Effect and mechanism of calcium carbonate whisker on asphalt binder”.
69. Yan, K., Xu, H., & You, L. (2015) “Rheological properties of asphalts modified by waste tire rubber and reclaimed low density polyethylene”, *Construction and Building Materials*, 83, pp. 143–149. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.02.092>.
70. Zhang, F., & Hu, C. (2016) “The research for crumb rubber/waste plastic compound modified asphalt”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, pp. 124, 729-741. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-015-5198-4>.
71. Zhou, G., Li, C., Wang, H., Zeng, W., Ling, T., Jiang, L., & Zhou, D. (2022) “Preparation of Wax-Based Warm Mixture Additives from Waste Polypropylene (PP) Plastic and Their Effects on the Properties of Modified Asphalt”, *Materials* [Preprint]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ma15124346>.