



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

**“EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS
CON POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (HDPE) RECICLADO”**

PRESENTADO POR:

11741457 DANIEL ALEJANDRO AVERRUZ PUERTO

ASESORA METODOLÓGICA: ING. KARLA ANTONIA UCLÉS BREVÉ

ASESORA TEMÁTICA: ING. LUZ MARINA FUNES

CAMPUS TEGUCIGALPA; MARZO, 2021.

RESUMEN EJECUTIVO

El proyecto de investigación se ha enfocado en la evaluación comparativa del desempeño de mezclas asfálticas modificadas y no modificadas, para lo que se ha llevado a cabo la sustitución porcentual de agregados pétreos por polietileno de alta densidad (HDPE por sus siglas en inglés), con el propósito de determinar el efecto de la utilización de polímeros reciclados de manera que sea posible reducir los costos por tonelada de las mezclas asfálticas y simultáneamente proponer una alternativa para el producto del reciclaje de plásticos en la búsqueda de la reducción de la contaminación del medio ambiente.

Para lograr el propósito de la investigación se han utilizado los procedimientos establecidos por las normas ASTM D5-06 y D 113-07 para cementos asfálticos, específicamente para determinar la calidad del cemento asfáltico a través de los ensayos de penetración y ductilidad. Se han llevado a cabo combinaciones de agregados pétreos y cemento asfáltico, con y sin inclusión de polímeros para mezclas modificadas y no modificadas, respectivamente y se ha logrado medir el desempeño del concreto asfáltico de acuerdo con lo establecido por el Manual de Carreteras de Honduras mediante el ensayo a Marshall, al obtener el grado de estabilidad y el volumen de vacíos del concreto asfáltico, parámetros que determinan la calidad de la mezcla asfáltica.

Mediante la norma ASTM C136-01 para la clasificación de los agregados pétreos se ha determinado la proporción de los elementos de la mezcla asfáltica, se han elegido los porcentajes de cemento asfáltico de los rangos que establece la norma D1559-76 del ensayo Marshall y se ha establecido una comparación entre el desempeño entre las mezclas asfálticas no modificadas y modificadas con HDPE, para 3%, 5% y 10% de sustitución de la masa de los agregados pétreos, resultando el 3% el porcentaje con mejor desempeño de las mezclas modificadas, sin embargo ha resultado con una disminución del desempeño en comparación con las mezclas no modificadas.

Complementariamente se ha llevado a cabo un análisis comparativo de costos por tonelada de mezclas asfálticas modificadas y no modificadas, resultando en una disminución porcentual de 0.16% para el 3% de sustitución porcentual de agregados pétreos por HDPE, porcentaje de sustitución de agregados pétreos por HDPE con los mejores resultados de desempeño.

Palabras clave: ductilidad, estabilidad, Marshall, penetración, pétreos.

ABSTRACT

The research project has focused on the comparative evaluation of the performance of modified and unmodified asphalt mixtures, for which the percentage substitution of petrous aggregates for HDPE plastic has been carried out, in order to determine the effect of the use of recycled polymers so that it is possible to reduce the costs per ton of asphalt mixtures and simultaneously propose an alternative for the product of recycling plastics in the pursuit of reducing environmental pollution.

To achieve the purpose of the investigation, the procedures established by ASTM D5-06 and D 113-07 standards for asphalt cements have been used, specifically to determine the quality of asphalt cement through penetration and ductility tests. Combinations of stone aggregates and asphalt cement have been carried out, with and without the inclusion of polymers for modified and unmodified mixtures respectively, and it has been possible to measure the performance of asphalt concrete in accordance with the provisions of the Honduran Highway Manual through the Marshall test, when obtaining the degree of stability and the void volume of the asphalt concrete, parameters that determine the quality of the asphalt mix.

By means of the ASTM C136-01 standard for the classification of petrous aggregates, the proportion of the elements of the asphalt mixture has been determined, the percentages of asphalt cement have been chosen from the ranges established by the D1559-76 standard of the Marshall test and has been established a comparison between the performance between unmodified and modified asphalt mixtures with HDPE, for 3%, 5% and 10% substitution of the mass of the stone aggregates, resulting in 3% being the percentage with the best performance of the modified mixtures, however it has resulted in a decrease in performance compared to unmodified blends.

Complementarily, a comparative analysis of costs per ton of modified and unmodified asphalt mixtures has been carried out, resulting in a percentage decrease of 0.16% for the 3% percentage substitution of stone aggregates by HDPE, percentage of substitution of stone aggregates by HDPE with the best performance results.

Keywords: ductility, Marshall, penetration, petrous, stability.

ÍNDICE DE CONTENIDO

I	Introducción	1
II	Planteamiento del problema	3
2.1	Precedentes del problema	3
2.2	Definición del problema	3
2.3	Justificación	4
2.4	Preguntas de investigación	5
2.5	Objetivos	5
2.5.1	Objetivo General	5
2.5.2	Objetivos Específicos	6
III	Marco teórico	7
3.1	Polietilenos	7
3.1.1	Polietileno de alta densidad	7
3.1.2	Polietileno de baja densidad	8
3.1.3	Reciclaje de polietilenos	8
3.2	Asfaltos	10
3.2.1	Cementos asfálticos	11
3.2.2	Asfaltos rebajados	12
3.2.3	Emulsiones asfálticas	13
3.3	Mezclas asfálticas	13
3.3.1	Mezclas Abiertas en Caliente	14
3.3.2	Mezclas abiertas en frío	14
3.3.3	Tratamientos superficiales	15
3.3.4	Lechadas	15

3.3.5	Composición de mezclas asfálticas	15
3.4	Normas y especificaciones para mezclas asfálticas	17
3.4.1	Manual de carreteras de Honduras	17
3.4.2	Normas ASTM	20
IV	Metodología	28
4.1	Enfoque	28
4.2	Variables de investigación	28
4.2.1	Variables dependientes	29
4.2.2	Variables independientes	30
4.3	Técnicas e instrumentos aplicados	31
4.3.1	Ensayo de granulometría de agregados pétreos	31
4.3.2	Ensayo de penetración	32
4.3.3	Ensayo de ductilidad	33
4.3.4	Ensayo Marshall	34
4.3.5	Cálculos y tabulación de datos	37
4.4	Materiales	37
4.4.1	Cemento Asfáltico	37
4.4.2	Agregados pétreos	38
4.4.3	HDPE.....	39
4.5	Metodología de Estudio	39
4.5.1	Procedimientos mecánicos	39
4.5.2	Procedimientos de cálculo para calificar el cemento asfáltico	46
4.5.3	Procedimientos de cálculo para mezclas no modificadas	47
1.1.1	Procedimientos de cálculo para mezclas modificadas	54

V	Resultados y análisis	59
5.1	Calificación del cemento asfáltico	59
5.1.1	Ensayo de Penetración	59
5.1.2	Ensayo de Ductilidad	60
5.1.3	Calificación del Cemento Asfáltico	60
5.2	Clasificación de los agregados pétreos	61
5.2.1	Granulometría de los Agregados Pétreos	62
5.3	Porcentaje óptimo de asfalto de mezclas asfálticas no modificadas	63
5.4	Desempeño de mezclas asfálticas modificadas y no modificadas	65
5.5	Costo por tonelada de mezclas asfálticas modificadas y no modificadas	68
VI	Conclusiones	72
VII	Recomendaciones	75

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1	Clasificación para el reciclado de plásticos	8
Ilustración 2	Proceso de destilación	10
Ilustración 3	Tamizadora mecánica	32
Ilustración 4	Máquina de ensayo de penetración	33
Ilustración 5	Ductilómetro	34
Ilustración 6	Aparato Marshall	34
Ilustración 7	Picnómetro y equipo de protección utilizado en ensayo Marshall	35
Ilustración 8	Compresor de aire	35
Ilustración 9	Compactadora de 10 lb	36
Ilustración 10	Calentador de agua	36

Ilustración 11 Logo de MS Excel.....	37
Ilustración 12 Cemento asfáltico utilizado.....	38
Ilustración 13 Agregados pétreos utilizados.....	38
Ilustración 14 HDPE utilizado en investigación.....	39
Ilustración 15 Reducción de la temperatura del asfalto	40
Ilustración 17 Ductilómetro	41
Ilustración 18 Agregados para ensayo Marshall.....	42
Ilustración 19 Proceso de mezclado.....	43
Ilustración 20 Mezclas asfálticas en reposo.....	43
Ilustración 21 Retirado de vacíos en mezcla suelta.....	44
Ilustración 22 Peso sumergido de pastillas compactadas	44
Ilustración 23 Aplicación de carga en máquina Marshall.....	45
Ilustración 24 Estabilidad (Ib).....	63
Ilustración 25 Gravedad específica de pastillas compactadas.....	63
Ilustración 26 Porcentaje de vacíos	64
Ilustración 27 Comparación de estabilidad de mezclas modificadas y no modificadas	66
Ilustración 28 Comparación de gravedad específica de mezclas modificadas y no modificadas ..	67
Ilustración 29 Comparación de porcentaje de vacíos de mezclas modificadas y no modificadas .	67
Ilustración 30 Curva granulométrica ajustada a límites de acuerdo a tamaño máximo del agregado grueso	93
Ilustración 31 Gráfica de estabilidad para mezclas modificadas con 3%, 5% y 10%.....	94
Ilustración 32 Gráfica de peso específico para mezclas modificadas con 3%, 5% y 10%.....	94
Ilustración 33 Gráfica de porcentaje de vacíos para mezclas modificadas con 3%, 5% y 10%	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Producción y generación de desperdicios plásticos en 2015.....	9
Tabla 2 Granulometría de agregado grueso.....	18
Tabla 3 Especificaciones de cementos asfálticos.....	19
Tabla 4 Especificaciones de mezclas asfálticas en caliente.....	19
Tabla 5 Tamaño de muestra de agregado grueso.....	21
Tabla 6 Cantidad máxima permitida de material retenida en un tamiz, kg.	22
Tabla 7 Dimensiones de contenedor para penetración.....	25
Tabla 8-Diagrama interactivo de variables de investigación	30
Tabla 9 Diagrama de flujo de ensayos realizados en la investigación	31
Tabla 10 Datos de ensayo de penetración	46
Tabla 11 Datos de ensayo de ductilidad	47
Tabla 12 Límites de granulometría de acuerdo a tamaño máximo.....	48
Tabla 13 Clasificación de los agregados.....	49
Tabla 14 Porcentajes ideales de agregados	50
Tabla 15 Masa de los materiales para 4% de asfalto.....	50
Tabla 16 Peso específico de los materiales	51
Tabla 17 Peso por material de mezcla.....	51
Tabla 18 Factor de corrección de estabilidad.....	53
Tabla 19 Contenido óptimo de asfalto.....	54
Tabla 20 Masa de los materiales para 3% de polietileno.....	55
Tabla 21 Peso específico de los materiales con HDPE	55
Tabla 22 Peso por material de mezcla modificada (3% HDPE).....	56

Tabla 23 Ensayo Marshall en mezclas modificadas con HDPE (3%).....	58
Tabla 24 Contenido óptimo de asfalto para mezclas modificadas con 3% de HDPE	58
Tabla 25 Resultados de penetración.....	59
Tabla 26 Resultados de ensayo de penetración	60
Tabla 27 Determinación del grado de viscosidad de acuerdo con el grado de penetración	61
Tabla 28 Especificaciones para CA 60-70.....	61
Tabla 29 Resultados de granulometría	62
Tabla 30 Porcentaje óptimo de asfalto	64
Tabla 31 Comparación del desempeño de mezclas asfálticas no modificadas y modificadas.....	66
Tabla 32 Ficha de costos unitarios de mezclas asfálticas no modificadas.....	70
Tabla 33 Ficha de costos unitarios de mezclas asfálticas modificadas con 3% de HDPE	71
Tabla 34 Asesoría técnica semana 1.....	79
Tabla 35 Asesoría técnica semana 2.....	80
Tabla 36 Asesoría técnica semana 3.....	81
Tabla 37 Asesoría técnica semana 4.....	82
Tabla 38 Asesoría técnica semana 5.....	83
Tabla 39 Asesoría técnica semana 6.....	84
Tabla 40 Asesoría técnica semana 7.....	85
Tabla 41 Asesoría técnica semana 8.....	86
Tabla 42 Ficha de costos unitarios de mezclas asfálticas modificadas con 5% de HDPE	87
Tabla 43 Ficha de costos unitarios de mezclas asfálticas modificadas con 10% de HDPE.....	88
Tabla 44-Masa de los materiales para 5% de HDPE	89
Tabla 45-Masa de los materiales para 10% de HDPE.....	89

Tabla 46 Polímeros utilizados para modificar asfaltos (Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos)	90
Tabla 47 Precios promedio de los materiales reciclables pagados en cada nivel de la cadena de valores.....	91
Tabla 48 Criterios de resultados Marshall para mezclas asfálticas	92
Tabla 49 Factor de corrección de estabilidad Marshall.....	96

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 -Asesoría semana 1	79
Anexo 2- Asesoría semana 2	80
Anexo 3 -Asesoría semana 3	81
Anexo 4- Asesoría semana 4	82
Anexo 5-Asesoría semana 5	83
Anexo 6-Asesoría semana 6	84
Anexo 7-Asesoría semana 7	85
Anexo 8-Asesoría semana 8	86
Anexo 11- Costos de mezclas modificadas con 5% de HDPE	87
Anexo 12-Costos de mezclas modificadas con 10% de HDPE.....	88
Anexo 13-Materiales 5% de HDPE.....	89
Anexo 14-Materiales 10% de HDPE	89
Anexo 15-Polímeros para mezclas asfaltos	90
Anexo 16-Precios de materiales reciclados en Honduras.....	91
Anexo 17-Criterios para mezcla del método Marshall.....	92
Anexo 18-Curva granulométrica ajustada por tamaño máximo	93

Anexo 19-Gráfica de estabilidad de mezclas modificadas	94
Anexo 20-Gráfica de peso específico de mezclas modificadas	94
Anexo 21- Gráfica de porcentaje de vacíos de mezclas modificadas.....	95
Anexo 22-Factor de corrección de estabilidad Marshall	96

SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	American Society for Testing and Materials
CA	Cemento Asfáltico
HDPE	High Density Polyethylene
INE	Instituto Nacional de Estadística
LDPE	Low Density Polyethylene
NAPA	National Asphalt Pavement Association
OPEP	Organización de los Países Exportadores de Petróleo
PET	Tereftalato de polietileno
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Policloruro de Vinilo

GLOSARIO

Agregados pétreos: conjunto de partículas inertes de gravas, arenas, finos o fillers, naturales o triturados. (Rondón, 2015)

Asfalto: material bituminoso que se obtiene de la destilación del petróleo en refinerías. (Mamlouk, 2009)

Cemento asfáltico: es un tipo de asfalto utilizado como ligante en mezclas asfálticas que se calienta para poder ser mezclado con los agregados pétreos. (Rondón, 2015)

Ductilidad: capacidad de los cementos asfálticos para mantenerse cohesionados bajo deformaciones inducidas por cargas de tránsito, medido en centímetros a 25 °C, utilizado para la evaluación de la calidad y clasificación de los cementos asfálticos. (ASTM International, 2008)

Llenante mineral (filler): partículas con diámetro menor a los 0.075 mm e índice de plasticidad igual a cero. (Rondón, 2015)

Mezclas asfálticas: combinación de los agregados pétreos y un ligante asfáltico. (Rondón, 2015)

Penetración: medida de la consistencia de los cementos asfálticos en décimas de milímetros a 25 °C, utilizada para la evaluación de la calidad y clasificación de los cementos asfálticos. (ASTM International, 2006)

Petróleo: sustancia compuesta por una mezcla de hidrocarburos, de color oscuro y olor fuerte, utilizada para la producción de combustibles y asfalto. (Mamlouk, 2009)

Polietileno: resina (polímero) derivada del petróleo, que se clasifica como un termoplástico. (Montalvo, 2007)

I INTRODUCCIÓN

El asfalto es un material bituminoso producto del proceso de destilación del petróleo que ha sido ampliamente utilizado en la construcción de pavimentos flexibles desde 1870, cuando en Nueva Jersey, Estados Unidos de América se construyó el primer pavimento asfáltico. Desde entonces ha sido investigado y modificado a lo largo del tiempo para la mejora del desempeño, dadas las nuevas exigencias de carga y condiciones climáticas dependiendo de cada país (Mamlouk, 2009). Con el fin de mejorar la calidad del cemento asfáltico se han identificado derivados del asfalto como la asfaltita, que aumenta la viscosidad y mejora el desempeño de las mezclas asfálticas. De igual forma, se han identificado materiales que pueden sustituir parcialmente a los agregados pétreos con el propósito de reducir el costo por tonelada del concreto asfáltico, como ser los polímeros y el caucho reciclados, cuya utilización como agregado del concreto asfáltico promueve la conservación del medio ambiente (Wong, 2017).

Se ha demostrado que el uso de plásticos de tereftalato de polietileno (PET) no provoca un efecto significativo en el desempeño esperado de las mezclas asfálticas, además de que genera una solución para la reducción de desechos plásticos, que tanto afectan al medio ambiente. Para demostrar el efecto de la adición de polímeros para fabricar mezclas asfálticas modificadas se han utilizado los ensayos de estabilidad Marshall, ductilidad y penetración, observando consistencia en el comportamiento de las mezclas modificadas en comparación con las mezclas no modificadas, o sea aquellas compuestas por agregados pétreos y cemento asfáltico (Wong, 2017).

El presente trabajo de investigación tiene como propósito determinar el efecto que tiene la sustitución porcentual de agregados pétreos por HDPE, un plástico con dificultad de reciclaje, en el

desempeño y costo de elaboración de las mezclas asfálticas modificadas en comparación con las mezclas asfálticas no modificadas, por lo que inicialmente se mostrará el procedimiento necesario para conocer la granulometría de los agregados pétreos utilizados para la elaboración de las mezclas asfálticas, seguido del procedimiento necesario para determinar la calidad del cemento asfáltico y su clasificación de acuerdo a lo indicado por el Manual de Carreteras de Honduras.

Posteriormente se mostrará el procedimiento para la determinación del contenido óptimo de asfalto para la elaboración de las mezclas asfálticas modificadas y no modificadas, utilizando el ensayo de resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas usando el aparato Marshall, realizado de acuerdo a lo indicado en la norma ASTM D 1559-76. Asimismo, se mostrará una tabla comparativa del desempeño de las mezclas asfálticas modificadas con diferentes porcentajes de sustitución de agregados pétreos (3%, 5% y 10%), porcentajes que han sido seleccionados a partir de una previa revisión de la literatura de referencia, donde se muestra que son los tres porcentajes de sustitución de agregados pétreos que menos afectan el desempeño de las mezclas asfálticas, para identificar el porcentaje con el mejor desempeño que será comparado con las mezclas asfálticas no modificadas.

Finalmente, como resultado del trabajo de investigación se mostrará una matriz comparativa del desempeño de las mezclas asfálticas modificadas con HDPE como sustituto porcentual de los agregados pétreos y de las mezclas no modificadas, utilizando el porcentaje de vacíos, estabilidad y gravedad específica como parámetros de medición de estabilidad y la diferencia del costo de elaboración de las mezclas asfálticas modificadas y no modificadas.

II PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 PRECEDENTES DEL PROBLEMA

El 44% del plástico fabricado a nivel mundial en la historia de la humanidad ha sido producido a partir del 2000. En números representa 2,000 millones de toneladas métricas en apenas 15 años, a comparación de 2,500 millones de toneladas entre 1950 y 2000. A nivel mundial se recicla menos de la quinta parte de la producción anual, siendo Europa el líder en reciclaje con un 7%, pero del plástico fabricado en toda la historia apenas el 9% ha sido reciclado, un 12% incinerado y el 79% restante ha sido depositado en vertederos o en el medio ambiente (Geyer, 2017). Algunas de las consecuencias de la desmedida producción de plástico en los últimos años se ven reflejadas en el desbalance de los ecosistemas marítimos, la contaminación química de acuíferos por micro plásticos, las emisiones de carbono emitidas en la producción y la liberación de gases tóxicos por quema en vertederos (Rojo-Nieto, 2017).

2.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

De acuerdo con el documento de "Diagnóstico de la cadena productiva de desechos sólidos en Honduras" Minelli (2012) afirma: "Los plásticos representan el 7% y 15% de los desechos sólidos en Tegucigalpa y San Pedro Sula, respectivamente" (p. 12). De acuerdo con la Dirección General de Gestión Ambiental (2017): "A nivel nacional se generan 1.97 millones de toneladas por año en residuos sólidos domiciliarios, de los que se quema el 59% de manera informal y apenas el 2% es reciclado" (p. 5). El mal manejo de los residuos sólidos en Honduras y la pérdida de biocapacidad a causa de la quema informal de residuos y los incendios forestales han provocado un aumento en el déficit ecológico del país, como indica la Red Global de Huella Ecológica en el reporte de 2017.

Por otro lado, según datos de la Dirección General de Hidrocarburos y Biocombustibles (2020): “Honduras ha incrementado el consumo de petróleo y sus derivados en los últimos 15 años, registrándose en 2020 un alza en el costo de importación, de 0.03% a 4.82%” (p. 4), lo que podría significar un aumento en los costos de producción de mezclas asfálticas para pavimentos en Honduras, de no ser por la producción interna de asfalto en el país, a partir de la compra de petróleo en crudo, con lo que las refinerías contrarrestan los costos de importación del producto terminado, aunque dependen del precio internacional del petróleo y según datos de la Organización de los Países Exportadores de Petróleo (OPEP) (2021): “Desde la caída del precio en mayo de 2020, el precio del barril de petróleo ha aumentado 5.23%” (p. 1).

2.3 JUSTIFICACIÓN

Se ha demostrado que la incorporación de polímeros en mezclas asfálticas mejora significativamente el desempeño y la durabilidad. Estudios previos demuestran aumentos considerables de estabilidad Marshall, punto de ablandamiento, resistencia a la penetración, entre otros. La profundización de estudios previos es importante para el desarrollo y mejoramiento de mezclas asfálticas modificadas con polímeros. Es necesaria el constante estudio de las mezclas asfálticas para una mejor comprensión del comportamiento, identificación de los factores que las afectan directa e indirectamente y conocimiento de nuevas metodologías con incorporación de polímeros en mezclas.

Así mismo, el manejo de desperdicios plásticos es cada vez más desafiante a nivel mundial, por lo que el desarrollo de mezclas asfálticas que permitan un óptimo reciclaje resulta de mucho beneficio para el medio ambiente. La incorporación de desperdicios plásticos en mezclas asfálticas, a través de medios de procesamiento de bajo consumo energético significan un avance en cuestión de reducción contaminación y de emisiones de carbono.

Dado lo anterior, el proyecto de investigación propone el análisis comparativo entre el desempeño de mezclas asfálticas modificadas con polímeros (HDPE) y las no modificadas, con el propósito de

mejorar el desempeño y reducir la contaminación como una alternativa para el manejo de desperdicios plásticos y la reducción de emisiones de carbono.

2.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

1. ¿Cuál es la calidad del cemento asfáltico a utilizar en el análisis comparativo del desempeño de mezclas asfálticas modificadas con HDPE como sustituto porcentual de agregados pétreos y mezclas asfálticas no modificadas?
2. ¿Qué porcentaje de la masa total de los agregados puede ser sustituido por plástico HDPE sin afectar el desempeño de las mezclas asfálticas?
3. ¿Cómo afecta el desempeño de las mezclas asfálticas la utilización de plásticos HDPE en sustitución porcentual de los agregados, en comparación con las mezclas asfálticas no modificadas?
4. ¿Qué porcentaje de plástico HDPE se pueda agregar a una mezcla asfáltica, de manera que no afecte el desempeño de la mezcla, en comparación con mezclas asfálticas no modificadas?
5. ¿Existe una diferencia significativa en el costo por metro cúbico de mezcla asfáltica con y sin la utilización de plásticos HDPE como sustitución porcentual de los agregados?

2.5 OBJETIVOS

2.5.1 OBJETIVO GENERAL

Identificar el porcentaje óptimo de plástico HDPE a ser utilizado como agregado de una mezcla asfáltica de manera que se logre el mejor desempeño, sustituyendo un volumen porcentual de los materiales pétreos, con el propósito de reducir la contaminación por desperdicios plásticos y determinar si existe una diferencia significativa en el costo por metro cúbico de mezcla asfáltica, haciendo uso de los ensayos de laboratorio de ductilidad y penetración para medir la calidad del cemento asfáltico, así como estabilidad Marshall para evaluar el desempeño de la mezcla asfáltica.

2.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar la calidad del cemento asfáltico en la medición del desempeño de mezclas asfálticas con la utilización de plásticos HDPE como agregados, en comparación con mezclas asfálticas no modificadas
2. Medir el desempeño de mezclas asfálticas modificadas para identificar el porcentaje de la masa total de los agregados que puede ser sustituido por plástico HDPE, sin afectar el desempeño.
3. Determinar la estabilidad y el porcentaje de vacíos de las mezclas asfálticas no modificadas y las modificadas mediante la utilización de plásticos HDPE como sustitución porcentual de los agregados.
4. Comparar el desempeño de las mezclas modificadas con diferentes porcentajes de HDPE en función de la estabilidad y el porcentaje de vacíos, para determinar si es posible definir un porcentaje de polímeros que no afecte los resultados esperados.
5. Determinar la diferencia en el costo por tonelada de mezcla asfáltica con y sin la utilización de plásticos HDPE como sustitución porcentual de los agregados.

III MARCO TEÓRICO

3.1 POLIETILENOS

El polietileno es una resina (polímero) derivada del petróleo, que se clasifica como un termoplástico por su comportamiento en presencia del calor. Los termoplásticos se ablandan en presencia del calor y se endurecen cuando se enfrían y pueden repetir el proceso indefinidamente, a diferencia de los termoestables, que se solidifican de forma definitiva en su moldeo y en presencia de altas temperaturas se carbonizan directamente (Montalvo, 2007).

El polietileno se puede clasificar en dos grupos de acuerdo a su densidad: polietileno de alta densidad y polietileno de baja densidad. Se caracterizan por su resistencia química, bajo peso específico, lenta combustibilidad y por ser un buen aislante eléctrico. Por su facilidad de moldeo es de amplio uso en el mercado, comúnmente usado en la fabricación de recipientes de bebidas, vajillas, botellas, bolsas, globos, juguetes, película, etc. (Guzmán, 2011).

3.1.1 POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

Como su nombre lo indica, el polietileno de alta densidad (HDPE) es un polietileno al que se le han modificado aspectos morfológicos, adicionando distintas unidades de etileno. A nivel microscópico sus moléculas presentan la mínima ramificación, dándole una densidad molecular mayor (Xavier Elias, 2012).

El HDPE es utilizado en gran parte de la industria del envase a excepción del agua y refresco, es visto en envases de detergentes, aceites y productos cosméticos. También es utilizado en la elaboración de tuberías, mesas, sillas y tapones de envases. Se caracteriza por tener una mayor

dureza, densidad (0.910 - 0.940 g/cm³) y resistencia al calor, pero una menor ductilidad que el polietileno de baja densidad (Xavier Elias, 2012).

3.1.2 POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD

A diferencia del HDPE el polietileno de baja densidad (LDPE) es un tipo de polietileno con una mayor ramificación entre moléculas, dando como resultado una menor densidad (0,92 - 0,94 g/cm³) que el HDPE. Se caracteriza por ser más flexible que el HDPE y poseer buena resistencia al impacto, altas temperaturas y sustancias químicas. Sus usos más comunes son para la fabricación de bolsas y sacos plásticos, filme transparente utilizado para el transporte y distribución de todo tipo de productos, objetos de menaje (vasos, platos y cubiertos) y tuberías (Xavier Elias, 2012).

3.1.3 RECICLAJE DE POLIETILENOS

Existe una clasificación general de los plásticos que permite diferenciar entre los seis principales tipos de plásticos producidos a nivel mundial con el fin de facilitar su clasificación para su reciclaje al final de su vida útil, colocando un número dentro de un triángulo como se muestra en la ilustración 1.

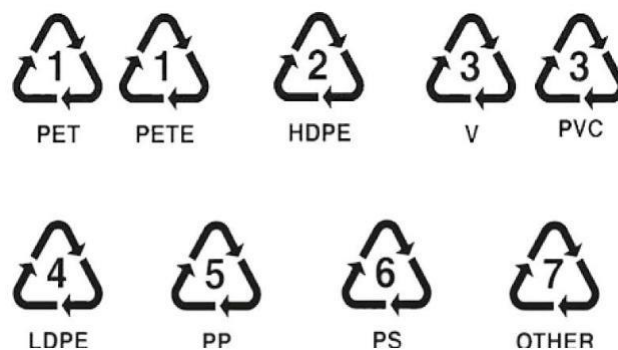


Ilustración 1 Clasificación para el reciclado de plásticos

Fuente: (Guzmán, 2011)

La dificultad de reciclaje del polietileno depende del tipo de polietileno que sea, pero en general el polietileno es responsable de la generación de más del 30% de desperdicios plásticos a nivel mundial por su dificultad de reciclaje, en particular del LDPE (Geyer, 2017).

Tabla 1 Producción y generación de desperdicios plásticos en 2015

Polymer type/additive	2015 Primary Production (Mt)	2015 Primary Waste Generation (Mt)
LD, LDPE	64	57
HDPE	52	40
PP	68	55
PS	25	17
PVC	38	15
PET	33	32
PUR	27	16
PP&A fibers	59	42
Other	16	11
Additives	25	17
Total	407	302

Fuente: (Geyer, 2017)

El HDPE es más sencillo de reciclar por su consistencia rígida que facilita el proceso de triturado mecánico y por su densidad que le permite flotar para lavar los contaminantes pesados que pudiera contener. El principal destino del HDPE reciclado es la fabricación de tapones, tuberías de riego y macetas. En el caso del LDPE el proceso de reciclaje es más complicado debido principalmente a su consistencia, dado que es muy flexible y en procesos de triturado termina enrollado en las cuchillas de las máquinas, por lo que se necesita equipo más sofisticado y afilar constantemente las cuchillas provocando que el proceso se vuelva muy costoso. Algunos destinos del LDPE reciclado son para la elaboración de tuberías, laminados para edificaciones, aislantes de cables y contenedores (Xavier Elias, 2012).

3.2 ASFALTOS

El asfalto es un material bituminoso que se obtiene de la destilación del petróleo en refinerías, donde se separan los distintos subproductos, como ser gasolina, queroseno y diésel, a través del incremento gradual de la temperatura, dando como residuo del proceso al asfalto. También es posible obtenerlo, con menor frecuencia, directamente de depósitos naturales (Mamlouk, 2009).

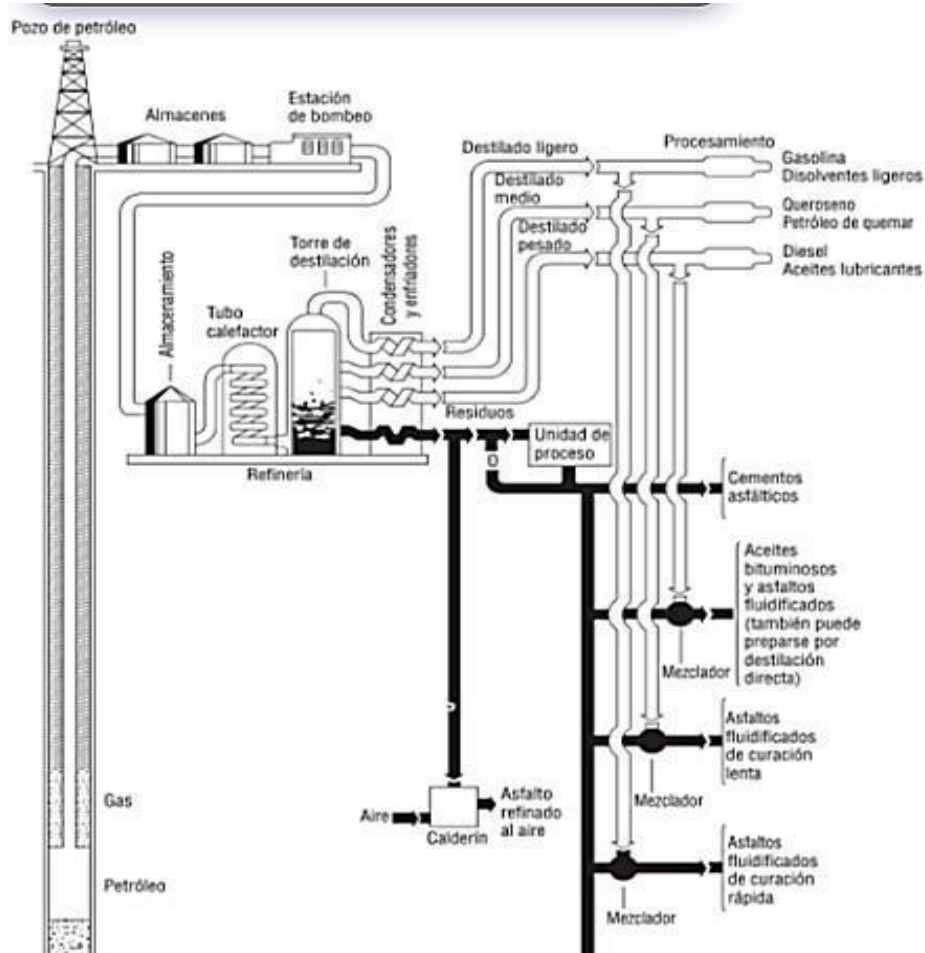


Ilustración 2 Proceso de destilación

Fuente: (Mamlouk, 2009)

De acuerdo con Rondón (2015) la principal función del asfalto es ligar el agregado pétreo en mezclas asfálticas, brindando a su vez impermeabilidad, resistencia mecánica bajo carga estática

o dinámica y durabilidad. El asfalto utilizado en la pavimentación de caminos se puede clasificar según el origen, en los siguientes tipos: asfaltos naturales, asfaltos modificados, asfaltos rebajados, cementos y emulsiones asfálticos, siendo los últimos tres los más utilizados en mezclas asfálticas.

3.2.1 CEMENTOS ASFÁLTICOS

El cemento asfáltico (CA) es un tipo de asfalto utilizado como ligante en mezclas asfálticas que se caracteriza por comportarse como sólido viscoso a temperatura ambiente y a medida se calienta se vuelve un fluido capaz de ser mezclado con los agregados pétreos. A las mezclas asfálticas que se fabrican con cemento asfáltico se les conoce como mezclas en caliente, por la forma en que se incorpora el CA a los agregados pétreos (Rondón, 2015).

El cemento asfáltico (CA) se puede caracterizar de acuerdo a su consistencia, comúnmente evaluada a través de los ensayos de penetración (ASTM D-5) y viscosidad (ASTM D-4402) a una temperatura controlada. Los resultados del ensayo de penetración muestran la resistencia de un cemento asfáltico a la penetración de una aguja normalizada a una temperatura estándar (25°C) (Rondón, 2015). En Honduras, el Manual de carreteras tomo 5 (1996), contempla cinco clasificaciones de acuerdo al rango de penetración en CA; siendo: CA (40-50); CA (60-70); CA (85-100); CA (120-150) y CA (200-300).

Para la viscosidad se debe calentar el cemento asfáltico y verterlo dentro de un viscosímetro que se encuentra a una temperatura estándar (60°C). La unidad de viscosidad está dada en poises y es una medida del tiempo que tarda el CA en fluir entre dos marcas del viscosímetro (Mamlouk, 2009). El Manual de carreteras tomo 5 (1996), contempla seis clasificaciones de acuerdo a la viscosidad (poises); siendo: CA-2.5, Ca-5.0, CA-10, CA-20, CA-30, CA-40.

También es posible la caracterización por grado de funcionamiento (PG), que enfoca la clasificación de acuerdo a que se garantice el cumplimiento de los criterios de especificación a la temperatura crítica del pavimento. A diferencia de los ensayos tradicionales, penetración, ductilidad y viscosidad, la clasificación PG considera tres rangos de temperaturas a los que deben ser realizados cada uno de los ensayos, tanto tradicionales como en nuevos ensayos. Algunos de estos nuevos ensayos son: horno de película delgada, envejecimiento a presión, punto de inflamabilidad, ensayo de viscosímetro rotacional y prueba de tracción directa (Mamlouk, 2009).

3.2.2 ASFALTOS REBAJADOS

Los asfaltos rebajados son cementos asfálticos diluidos en algún solvente derivado del petróleo como gasolina o queroseno. El asfalto rebajado, también conocido como asfalto líquido o fluidificado se puede caracterizar en tres tipos, dependiendo del solvente utilizado, derivado del petróleo: asfaltos rebajados de curación rápida (RC), asfaltos rebajados de curación media (MC) y asfaltos de curación lenta (LC). Además, se conocen diferentes grados de viscosidad cinemática a 60°C (30, 70, 250, 800 y 3000) para asfaltos rebajados, por lo que el tipo de asfalto rebajado es acompañado por el grado de viscosidad. Por ejemplo, un asfalto RC-70 es un asfalto rebajado de curación rápida con un grado de 70 (Mamlouk ,2009).

Los asfaltos de curación rápida son elaborados con disolventes altamente volátiles, como ser la gasolina y su periodo de curado (evaporación del solvente) se encuentra entre los 5 y 10 minutos. Los de curación media utilizan un residuo de dureza media y disolventes menos volátiles, como ser el queroseno y su tiempo de curado es de unos pocos días. Finalmente, los de curación lenta son elaborados con disolventes de baja volatilidad, como ser aceites pesados o simplemente

interrumpiendo el proceso de refinado, impidiendo que el combustible sea eliminado del producto (Mamlouk, 2009).

3.2.3 EMULSIONES ASFÁLTICAS

Las emulsiones asfálticas son el resultado de la adición de agua al cemento asfáltico, haciendo uso de un agente emulsificante que puede ser un silicato soluble o típicamente un jabón. Los agentes emulsificantes pueden aportar cargas negativas o positivas, dividiendo las emulsiones asfálticas en emulsiones aniónicas y catiónicas respectivamente. Dependiendo de la concentración de la emulsión, las emulsiones asfálticas pueden variar en tiempo de curado, dando como resultado tres clasificaciones principales; siendo: emulsiones de fraguado rápido (RS), emulsiones de fraguado medio (MS) y emulsiones de fraguado lento (LS). En caso que las emulsiones anteriores utilicen un agente catiónico, se les antepone la letra C y en caso de que no se use la letra C, se sabrá que se trata de un agente aniónico. Por ejemplo, una emulsión asfáltica de fraguado rápido catiónica, se nombra como RSC (Mamlouk ,2009).

3.3 MEZCLAS ASFÁLTICAS

Rondón (2015) define las mezclas asfálticas como: "La combinación de los agregados pétreos y un ligante asfáltico" (p. 37). Pueden ser elaboradas en plantas mezcladoras o en el lugar de la obra. Sus distintas clasificaciones dependen del ligante asfáltico utilizado, como ser cemento asfáltico para mezclas asfálticas en caliente o emulsiones asfálticas para mezclas abiertas en frío (Rondón, 2015).

3.3.1 MEZCLAS ABIERTAS EN CALIENTE

Las mezclas asfálticas en caliente o concretos asfálticos, están compuestos por cemento asfáltico y agregados pétreos mezclados a altas temperaturas (140°C-180°C) en plantas especializadas y compactados todavía en caliente. Comúnmente el contenido de cemento asfáltico es del 4% al 7% de asfalto, dejando el resto de la mezcla compuesto por agregados pétreos. Las mezclas en caliente, también se caracterizan por presentar un bajo contenido de vacíos con aire, agregados pétreos con granulometría bien gradada y tamaños de partícula diferentes (grava, arena, finos, filler mineral) (Rondón, 2015).

Las mezclas asfálticas en caliente son las más utilizadas en pavimentaciones en el país, conformando según datos del Instituto Nacional de Estadísticas (INE) (2018): "El 54.8% de las carreteras en Honduras, predominando su uso en la red principal".

3.3.2 MEZCLAS ABIERTAS EN FRÍO

Las mezclas asfálticas abiertas en frío están compuestas por asfalto líquido (rebajado o emulsificado) y agregados pétreos. Se caracterizan por ser mezcladas a temperatura ambiente y por tener agregados con una granulometría mal gradada. Usualmente son empleadas en obras de bacheo y en construcción de superficies de carretera de bajo volumen de tráfico (Rondón, 2015).

Algunas de las ventajas de utilizar mezclas asfálticas abiertas en frío es que pueden ser mezcladas en la obra a temperatura ambiente, facilitando la construcción y reduciendo los costos de transporte a comparación de las mezclas en caliente. También reducen el fenómeno de hidro planeo, que se da por la presencia de agua en la carretera provocando una pérdida de tracción, debido a que permiten el ingreso de agua a la mezcla durante lluvia (Rondón, 2015).

3.3.3 TRATAMIENTOS SUPERFICIALES

Los tratamientos superficiales son capas de emulsiones asfálticas, cementos asfálticos o rebajados que se pulverizan seguido de una capa de árido. Son utilizados en mantenimientos de pavimentos o como capas de protección de superficies con bajo volumen de tráfico. El principal objeto de los tratamientos superficiales es de sellar y prolongar la vida útil de los pavimentos y dependiendo del caso será la complejidad de elaboración de los tratamientos. Algunos tratamientos utilizados incluyen tratamientos de capa simple, doble, con aplicación única de asfalto, riegos e imprimación (Mamlouk, 2009).

3.3.4 LECHADAS

Una lechada es una variante moderna de los tratamientos superficiales y consiste en la mezcla de asfalto emulsificado con agregado fino bien gradado y llenante mineral. Son mezclas en frío, por lo que se mezclan en el sitio de la obra y son aplicadas a temperatura ambiente. Se clasifican de acuerdo a la granulometría de los agregados en: fina (2.5 mm), media (5 mm) y gruesa (7 mm). Al igual que los tratamientos superficiales, su función principal es el sellado y prolongamiento de la vida útil del pavimento, con la diferencia de que mejoran la resistencia al deslizamiento de la superficie (Rondón, 2015).

3.3.5 COMPOSICIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Como se definió anteriormente las mezclas asfálticas son la combinación de agregados pétreos, que son el conjunto de partículas inertes clasificadas de acuerdo a su tamaño y un ligante asfáltico. Las mezclas asfálticas se clasifican de acuerdo al tipo de ligante empleado en su elaboración, como ser cemento asfáltico para mezclas asfálticas en caliente o emulsiones asfálticas para mezclas abiertas en frío.

3.3.5.1 Mezclas Asfálticas No Modificadas

Como ya se ha definido, el cemento asfáltico (CA) es un ligante derivado del petróleo de consistencia sólida viscosa a temperatura ambiente, que requiere ser calentado a altas temperaturas para poder adherirse a los agregados pétreos. Se clasifica de acuerdo a su consistencia, evaluada a través de ensayos ASTM que miden su viscosidad y grado de penetración. En Honduras el Manual de carreteras tomo 5 (1996) contempla cinco clasificaciones de CA de acuerdo a el rango de penetración y seis clasificaciones de acuerdo a la viscosidad.

El término de agregados pétreos en pavimentos hace referencia al conjunto de partículas inertes de gravas, arenas, finos o *fillers*, naturales o triturados. Los agregados pétreos conforman la mayor parte del peso y volumen de los pavimentos, tanto en pavimentos flexibles como rígidos. En general para la elaboración de pavimentos, los agregados pétreos son tamizados en ensayos de granulometría, donde se dividen por tamaño de partícula (Rondón, 2015).

A las partículas con diámetro entre los 2 mm y 6.4 cm se les denomina gravas. Partículas con diámetro entre 0.075 y 2 mm se les denomina arenas, finas y gruesas. Y a las partículas con diámetro menor a los 0.075 mm se les reconoce como tamaño de arcilla, pero para el diseño de pavimentos flexibles se les conoce como *filler* o llenante mineral en español, si presentan un índice de plasticidad igual a cero (Rondón, 2015).

3.3.5.2 Mezclas Asfálticas Modificadas

Las mezclas asfálticas modificadas son una variante de las mezclas en caliente, consisten en una mezcla en caliente a la que se le agregan polímeros o aditivos para el mejoramiento de las propiedades. Existen dos técnicas de modificación, por vía húmeda y seca. Por vía húmeda el polímero o aditivo es agregado al asfalto en caliente y luego es mezclado con los agregados pétreos. Por vía seca el polímero o aditivo reemplaza una parte del agregado pétreo y es

incorporado al agregado a alta temperatura para luego ser mezclado con el asfalto. Las mezclas asfálticas modificadas por vía húmeda requieren de mayores temperaturas equipos especiales de mezclado, pero un menor tiempo de compactación, a comparación de las mezclas modificadas por vía seca (Rondón, 2015).

Como se menciona anteriormente, las mezclas asfálticas modificadas en seco requieren de menores temperaturas de mezclado, por lo que es posible utilizar polímero con menor punto de fusión como ser plásticos LDPE y HDPE que al ser mezclados con el agregado pétreo producen una película de plástico alrededor de los agregados. Las mezclas modificadas vía húmeda por el contrario pueden emplear prácticamente cualquier tipo de plástico (PP, PET, PP, PS y PE), a excepción del PVC debido a la emisión de cloruro, gracias a la temperatura de mezclado requerida para su elaboración (Richard Willis, 2020).

3.4 NORMAS Y ESPECIFICACIONES PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS

3.4.1 MANUAL DE CARRETERAS DE HONDURAS

Los materiales de uso vial en el manual de carreteras de Honduras son regidos por las especificaciones y normas de ensayo correspondientes a ASTM y AASHTO, según se indica en su tomo 5, capítulo 1 sección 700. La clasificación de los cementos asfálticos de acuerdo a su grado de penetración está dada por de acuerdo a la especificación AASHTO M-20 definiendo cinco tipos: CA (40-50), CA (60-70), CA (85-100), CA (120-150) y CA (200-300).

De acuerdo a su viscosidad medida a 60 °C, los asfaltos son clasificados según lo indicado por la especificación M-226 en seis tipos: (CA-2.5, Ca-5.0, CA-10, CA-20, CA-30, CA-40) (Manual de carreteras tomo 5, 1996).

En la sección 703.02 se definen los requisitos de los agregados pétreos para mezclas asfálticas elaboradas en planta. El agregado grueso deberá ser de piedra triturada, cumpliendo con lo indicado en la siguiente tabla:

Tabla 2 Granulometría de agregado grueso

#	2"	1 1/2"	1"	1/2"	N°4	N°8	N°30	N°200
%P	100	95/100	70/90	45/70	25/50	17/4	7/22	0/6

Fuente: (carreteras, Manual de carreteras tomo 5, 1996)

El agregado fino (pase #8) deberá tener una graduación adecuada, de tal manera que, al ser combinada con los demás componentes, la mezcla resultante pueda satisfacer la graduación requerida.

En el tomo 4, capítulo 1 sección 1, se definen las consideraciones relativas a mezclas asfálticas en caliente y la elección del grado de cemento asfáltico. El manual hace la diferencia entre una dosificación y un diseño de mezcla asfáltica porque comúnmente el Método Marshall es denominado como método de diseño, siendo un método de dosificación. Los métodos de dosificación definen el porcentaje óptimo de asfalto que mezclado con los agregados pétreos permite obtener una mezcla asfáltica que cumple con los requisitos de estabilidad. Por otro lado, el diseño de mezclas asfálticas no solo debe considerar la dosificación de los componentes, sino también la elección apropiada del tipo y calidad de los agregados y el asfalto, características de flujo de tránsito, temperaturas ambientales, espesor y tipo de capa asfáltica (Manual de carreteras tomo 4, 1996).

La elección del grado de cemento asfáltico dependerá de las temperaturas máximas y mínimas medias de la capa asfáltica, de la categoría del tránsito (Liviano, medio y pesado) y la susceptibilidad térmica del asfalto, expresada en PVN (Penetración – Viscosidad – Número). El manual relaciona la

susceptibilidad térmica únicamente con el índice de penetración (IP), por su amplio uso en el país (Manual de carreteras tomo 4, 1996).

Tabla 3 Especificaciones de cementos asfálticos

	ESPECIFICACIONES PARA CEMENTOS ASFÁLTICOS									
	GRADO DE PENETRACIÓN									
	40 - 50		60 - 70		85 - 100		120 - 150		200 - 300	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Penetración a 25 C (77 F) 100g., 5 sec.....	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Punto de Inflamación, vaso abierto de Cleveland °F.....	450	-	450	-	450	-	425	-	350	-
Ductilidad a 25 C (77 F) 5 cm. por min., cm.....	100	-	100	-	100	-	100	-	-	-
Solubilidad en tricloro etileno, en %.....	99	-	99	-	99	-	99	-	99	-
Ensayo de película delgada en el horno 1/8 in. (3.2 mm), 163 C (325 F) 5 horas.....										
Pérdida por calentamiento, %.....	-	0.8	-	0.8	-	1.0	-	1.3	-	1.5
Penetración del residuo, % del original.....	58	-	54	-	50	-	46	-	40	-
Ductilidad del residuo a 25 C (77 F) 5 cm. por min., cm.....	-	-	50	-	75	-	100	-	100	-
Ensayo de la mancha (cuando y como se especifique, NOTA 1) con:										
- Solvente nafta standard										Negativo para todos los grados
- Solvente nafta standard, % de xileno										Negativo para todos los grados
- Solvente heptano xileno % xileno										Negativo para todos los grados

Fuente: (carreteras, Manual de carreteras tomo 5, 1996)

Tabla 4 Especificaciones de mezclas asfálticas en caliente

	TRANSITO		
	PESADO ($N > 1 \times 10^6$)	MEDIANO ($1 \times 10^4 < N < 1 \times 10^6$)	LIVIANO ($N < 1 \times 10^4$)
Número de Golpes	75	75	50
Estabilidad (Kg)	• 1.000	• 700	• 500
Fluencia (cm.)	0,20 - 0,35	0,20 - 0,35	0,20 - 0,40
Vacios (%)			
Carpeta de Rodamiento*	3 - 5	3 - 5	3 - 5
Base Intermedia	3 - 6	3 - 8	3 - 8
Base Inferior	3 - 8	3 - 8	3 - 8
VAM Mínimo (%)*			
Función del Tamaño Máximo Nominal del Arido	13 - 15	13 - 15	13 - 15
Estabilidad Remanente*	• 75 %	• 75 %	• 75 %
RBV*	75 - 85 %	75 % - 85 %	75 - 85 %

Fuente: (carreteras, Manual de carreteras tomo 5, 1996)

3.4.2 NORMAS ASTM

ASTM International es una organización internacional sin fines de lucro enfocada en el desarrollo de normativas por consenso y su aplicación en múltiples materias. Las normas ASTM son documentos desarrollados por consenso dentro de la organización que certifican el correcto proceso de elaboración de un ensayo, material o su clasificación. Las normas son arbitrarias, por lo que el usuario decide utilizarlas, pero normalmente los gobiernos hacen referencia a ellas en códigos, leyes y regulaciones, así como las compañías las incorporan en los contratos, con el fin de estandarizar los procesos y la calidad de los materiales a utilizar en determinada materia (ASTM International, 2014).

3.4.2.1 Método de ensayo normalizado para determinar el análisis granulométrico de los agregados finos y gruesos

A la distribución por tamaño de los materiales a utilizar como agregados pétreos se le denomina distribución granulométrica y el ensayo, equipo y condiciones que se deben utilizar para determinar la granulometría es regulado por la norma ASTM C 136-01. Consiste en una muestra de agregados (grueso o fino) de masa conocida que es separada (tamizada) a través de una serie de tamices de aberturas progresivamente menores, con el fin de conocer la distribución de los tamaños (ASTM International, 2001).

El equipo especificado puede ser visualizado en la sección 4.3.1 del presente informe y consta de una balanza utilizada para el ensayo en agregados finos con una precisión de 0.1 g y para el ensayo en agregados gruesos o mezcla de agregados finos y gruesos con una precisión de 0.5 g. Se requieren tamices con mallas montadas en bastidores que cumplan con las especificaciones indicadas en la especificación E 11, un tamizador mecánico que garantice el movimiento de las

partículas en diferentes orientaciones con respecto a la superficie del tamiz y un horno capaz de mantener una temperatura uniforme de 110 °C con una variación máxima de 5 °C (ASTM International, 2001).

El procedimiento de ensayo indicado por la norma establece como primer paso el muestreo de los agregados de acuerdo a lo indicado en la práctica normalizada para el muestreo de los áridos ASTM D 75, que consiste en seleccionar una muestra representativa de los agregados por cuarteo, usando una máquina normalizada o de manera manual y reduciendo el tamaño de la muestra en concordancia con el peso requerido para el ensayo, siendo 300 g para el agregado fino y de acuerdo al tamaño máximo nominal para el agregado grueso, como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5 Tamaño de muestra de agregado grueso

Tamaño máximo nominal mm (pulg.)	Tamaño de la muestra de ensayo kg (lb)
9.5 (3/8)	1 (2)
12.5 (1/2)	2 (4)
19.0 (3/4)	5 (11)
25.0 (1)	10 (22)
37.5 (1 1/2)	15 (33)
50 (2)	20 (44)
63 (2 1/2)	35 (77)
75 (3)	60 (130)
90 (3 1/2)	100 (220)

Fuente: (ASTM International, 2001)

Luego se deben secar las muestras de agregados finos y gruesos a una temperatura de 110 °C con una variación máxima de 5 °C y se deben seleccionar los tamices con las aberturas adecuadas para obtener la información requerida por las especificaciones relacionadas al agregado que se

desea ensayar. Los tamices deben ser colocados en orden de tamaño decreciente y la muestra debe ser colocada en el tamiz superior. Los tamices pueden ser agitados a mano o con un aparato agitador denominado tamizadora mecánica durante 15 minutos. Pasado el tiempo de tamizado, se debe verificar que no se exceda el límite de material retenido en un tamiz, como se indica en la tabla 6.

Tabla 6 Cantidad máxima permitida de material retenida en un tamiz, kg.

Tamaño de apertura del tamiz, mm	Dimensiones nominales de los tamices ^A				
	203,2 mm diám ^B	254 mm diám ^B	304,8 mm diám ^B	350 por 350 mm	372 por 580 mm
	Área de tamizado, m ²				
	0,0285	0,0457	0,0670	0,1225	0,2158
125	c	c	c	c	67,4
100	c	c	c	30,6	53,9
90	c	c	15,1	27,6	48,5
75	c	8,6	12,6	23,0	40,5
63	c	7,2	10,6	19,3	34,0
50	3,6	5,7	8,4	15,3	27,0
37,5	2,7	4,3	6,3	11,5	20,2
25,0	1,8	2,9	4,2	7,7	13,5
19,0	1,4	2,2	3,2	5,8	10,2
12,5	0,89	1,4	2,1	3,8	6,7
9,5	0,67	1,1	1,6	2,9	5,1
4,75	0,33	0,54	0,80	1,5	2,6

Fuente: (ASTM International, 2001)

Finalmente se debe registrar la masa de retenido por cada tamiz en la balanza con la precisión indicada anteriormente. La masa total de material tamizado no deberá variar en más del 1% con respecto a la masa inicial de ensayo. Se debe reportar el porcentaje de pase de material por cada tamiz, el porcentaje de retenido acumulado por tamiz, el retenido acumulado y el módulo de finura de ser requerido.

3.4.2.2 Método estándar de prueba para ductilidad de materiales bituminosos

La ductilidad de un material bituminoso se define como la medida en la cual este puede ser estirado, antes de romperse en dos. La distancia a la que se rompe en centímetros se le denomina como su ductilidad. La normativa que rige la determinación de la ductilidad de un asfalto es la norma ASTM D 113 – 07 y regula el procedimiento de ensayo, el equipo a utilizar y las condiciones en las cuales debe ser realizado (ASTM International, 2008).

Las condiciones de ensayo especifican que se debe mantener una temperatura de 25°C con una variación no mayor a 0.5°C y una velocidad constante de estiramiento de 5 cm/min con una variación no mayor a 5% (ASTM International, 2008).

El equipo especificado consta de un molde estandarizado hecho de latón, un contenedor de agua para especímenes que sea capaz de mantener la temperatura del ensayo variando no más de 0.5 °C, una máquina de ensayo que permita mantener inmerso el espécimen mientras es estirado a la velocidad especificada desde las esquinas del molde, un agente de liberación (glicerina, arcilla o aceite) que prevenga la adhesión del asfalto al molde, un aditivo de ajuste de gravedad específica del agua (cloruro de sodio) que prevenga la flotación del espécimen en la superficie del agua y una hornilla capaz de calentar el asfalto para poder ser vertido en el molde (ASTM International, 2008).

El procedimiento indica como primer paso la aplicación del agente de liberación en el molde y en la placa de latón que se coloca por debajo, luego se procede a calentar el CA hasta que está suficientemente fluido para ser vertido en el molde. Luego de verter el CA en el molde se deben esperar alrededor de 35 min para que se enfríe a temperatura ambiente. Mientras el espécimen se enfría, se debe preparar el baño de agua agregando el aditivo de ajuste de gravedad específica al

agua y se debe ajustar la temperatura del agua a 25 °C. Luego se debe separar la muestra de la placa de latón con el cuidado de no deformarla y se coloca dentro del aparato de ensayo (ductilómetro) por 90 minutos previo a ser ensayada. Finalmente se inicia el ensayo tirando de los extremos del molde en el ductilómetro a la velocidad y temperatura especificadas hasta que el espécimen se rompa, midiéndose desde el extremo de inicio la distancia (cm) a la que ocurrió la ruptura (ASTM International, 2008)

3.4.2.3 Método estándar de prueba para penetración de materiales bituminosos

El ensayo de penetración está regulado por la norma ASTM D5-06 cuyo objetivo principal consiste en medir la dureza o consistencia del cemento asfáltico mediante la penetración de una aguja normalizada de 100 g en una muestra de cemento asfáltico colocada en un recipiente normado, a una temperatura de referencia de 25°C durante 5 segundos, para medir la profundidad de la unidad más cercana a 0.1 mm (ASTM International, 2006).

El aparato utilizado denominado penetrómetro puede observarse en la ilustración 6 de la sección 4.3.2 del presente informe.

El procedimiento indicado en la norma consiste en el calentamiento del CA a ensayar a una temperatura que permita el vertido en el recipiente normado, la profundidad del recipiente dependerá del diámetro del recipiente y la penetración esperada del CA, como se observa en la tabla 5 y luego de ser vertido se debe verificar que la profundidad que contiene CA sea al menos 120% de la profundidad de penetración esperada. Posteriormente se debe reposar el CA hasta que alcance una temperatura de 25 °C, para poder realizar el ensayo haciendo uso de la aguja

normalizada. Se deben realizar cinco penetraciones en el CA, cada una por cinco segundos 24

asegurándose de limpiar la aguja luego de cada penetración. Finalmente, se debe verificar que los valores de penetración no difieran por más de 4 unidades entre el valor más alto y el valor más bajo, para poder calcular el promedio de penetración (ASTM International, 2006).

Tabla 7 Dimensiones de contenedor para penetración

Especificación diámetro y profundidad interna de recipientes de acuerdo a penetración esperada	mm
Para penetraciones menores a 40:	
Diámetro	33-50
Profundidad interna	8-16
Para penetraciones menores a 200:	
Diámetro	55
Profundidad interna	35
Para penetraciones entre 200 y 350:	
Diámetro	55-75
Profundidad interna	45-70
Para penetraciones entre 350 y 500:	
Diámetro	55
Profundidad interna	70

FUENTE: (ASTM International, 2006)

3.4.2.4 Resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas usando el aparato Marshall

El ensayo de resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas usando el aparato Marshall está regulado por la norma ASTM D 1559-76 que determina la resistencia al flujo plástico de especímenes cilíndricos de mezclas asfálticas para pavimentación, aplicando una carga lateral haciendo uso del aparato Marshall (ASTM International, 1976).

El equipo necesario para el ensayo indicado en la norma es ilustrado en la sección 4.3.4 del presente informe y consiste de un molde de compactación cilíndrico de 4 in de diámetro y 3 in de

altura con su respectiva base y collarín, un martillo de compactación de 10 lb con superficie de contacto circular y una caída libre de 18 in, un sistema de extracción de especímenes que consiste de un disco de diámetro no menor a 3.95 in al que se le aplica una carga utilizando el equipo hidráulico más conveniente, un molde de ensayo que consiste de dos segmentos cilíndricos con radio de curvatura de 2 in que se ensamblan con la ayuda de dos barras perpendiculares sujetas al segmento inferior, el aparato de ensayo Marshall que es capaz de aplicar y medir la carga perpendicular al molde de ensayo y de medir la deformación del espécimen ensayado, un horno y hornillas para poder calentar los agregados pétreos y el cemento asfáltico respectivamente y un calentador de agua para poder calentar las pastillas compactadas a la temperatura de ensayo (60 °C) (ASTM International, 1976).

El procedimiento para la elaboración de los especímenes de ensayo consiste en primer lugar en la preparación de los agregados pétreos, secándolos en el horno a una temperatura de 105-110 °C por 24 horas junto con los moldes de compactación y el CA se debe calentar a una temperatura de 170 °C en una hornilla no más de una hora para evitar sobrecalentamiento. La fracción de cada agregado correspondiente a los porcentajes de asfalto a ensayar deben ser pesados (1,200 g por espécimen) y mezclados en un recipiente metálico donde posteriormente se incorporará el CA. El CA asfáltico debe ser incorporado sobre una hornilla para garantizar una temperatura de 155 °C de mezclado. Inmediatamente después de mezclar los agregados y el CA, se debe llenar el molde de compactación, garantizando una adecuada distribución de los agregados. Luego el molde es llevado a la máquina de compactación, donde se deben aplicar 75 golpes por cada cara para tráfico pesado y medio y 50 golpes para tráfico liviano (ASTM International, 1976).

El procedimiento de ensayo de los especímenes indica que se deben reposar un mínimo de 5 horas a temperatura ambiente sobre una superficie horizontal. Posteriormente se deben retirar los especímenes de los moldes, utilizando el equipo hidráulico y se debe llevar el agua del calentador a una temperatura de 60 °C durante 30 minutos. Finalmente se debe secar de manera superficial el espécimen a ensayar y se debe colocar inmediatamente en el molde de ensayo para poder aplicar la carga lateral haciendo uso de la máquina Marshall y se debe registrar la carga máxima y deformación registradas por la máquina para los procedimientos de cálculo.

IV METODOLOGÍA

4.1 ENFOQUE

“El enfoque cuantitativo hace uso de la recolección de datos para probar una hipótesis, con base en la medición numérica y el análisis estadístico, para poder establecer patrones de comportamiento y probar teorías” (Hernández & Fernández, 2006, p. 5). La evaluación del desempeño de mezclas asfálticas modificadas con HDPE busca comparar el comportamiento de mezclas asfálticas modificadas con las no modificadas, haciendo uso de ensayos de laboratorio que miden su desempeño como parámetro comparativo. La evaluación del comportamiento de las mezclas asfálticas determinará si son afectadas por la sustitución porcentual de agregados pétreos por HDPE.

4.2 VARIABLES DE INVESTIGACIÓN

Hernández y Fernandez (2006) definen las variables como “Una propiedad que puede fluctuar y cuya variación es susceptible de medirse u observarse. Existen variables independientes o causales y a los efectos se les conoce como variables dependientes” (p. 132).

Según el tipo de relación entre variables dependientes e independientes, se pueden definir esquemas de relación bivariadas o multivariadas. En las relaciones bivariadas existe una conexión entre una variable independiente y una variable dependiente. En las multivariadas, existe una relación entre diversas variables independientes y una dependiente, o viceversa (Hernández & Fernández, 2006).

Se consideran como variables dependientes de la investigación a los parámetros de desempeño y de costo de las mezclas asfálticas y como independientes a los distintos porcentajes de HDPE agregados como sustitutos porcentuales de agregados pétreos en mezclas asfálticas modificadas.

4.2.1 VARIABLES DEPENDIENTES

4.2.1.1 Desempeño de mezclas asfálticas no modificada

El desempeño de las mezclas asfálticas no modificadas será evaluado a través de los resultados de los ensayos de desempeño Marshall realizados a la prueba control de 0% de contenido de HDPE y será medido en libras para estabilidad, porcentaje para volumen de vacíos y en 1/10 de pulgada para flujo.

4.2.1.2 Desempeño de mezclas asfálticas modificadas con HDPE

El desempeño de las mezclas asfálticas modificadas con HDPE será evaluado a través de los resultados de los ensayos de desempeño Marshall realizados a los distintos porcentajes de sustitución del peso de agregados pétreos por HDPE propuestos (3%, 5% y 10%) y será medido en libras para estabilidad, porcentaje para volumen de vacíos y en 1/10 de pulgada para flujo.

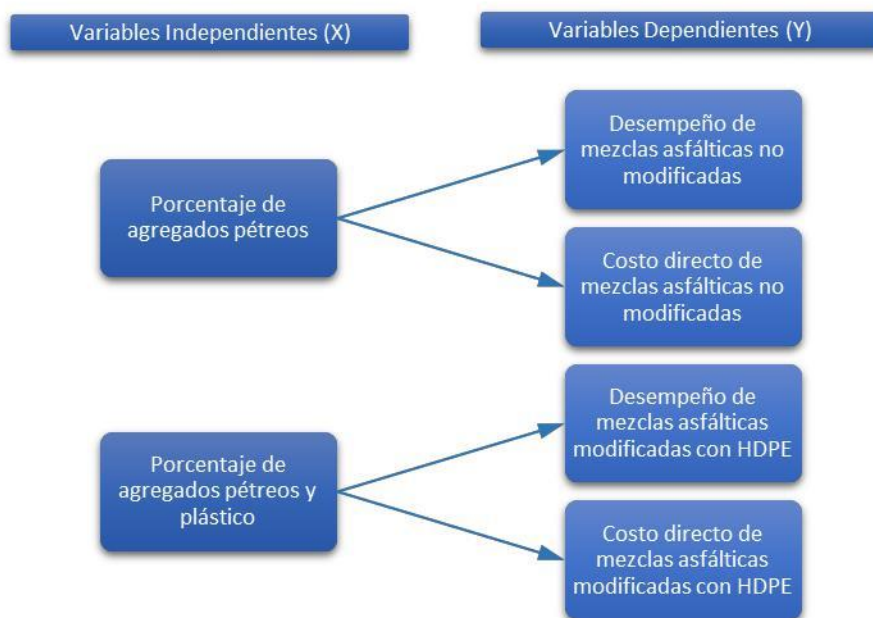
4.2.1.3 Costo directo de mezclas asfálticas modificadas con HDPE

El costo directo de mezclas asfálticas con HDPE será evaluado considerando el precio de venta de HDPE reciclado (L./ton), el costo del cemento asfáltico (L./ton) y agregados pétreos utilizados (L./m³) y será medido en lempiras (L.)

4.2.1.4 Costo directo de mezclas asfálticas no modificadas

El costo directo de mezclas asfálticas no modificadas será evaluado considerando el costo del cemento asfáltico (L./ton) y agregados pétreos utilizados (L./m³) para su elaboración y será medido en lempiras (L.)

Tabla 8-Diagrama interactivo de variables de investigación



4.2.2 VARIABLES INDEPENDIENTES

4.2.2.1 Porcentajes de agregados pétreos y plástico

A partir del diseño de la mezcla asfáltica se determinará el porcentaje óptimo de asfalto y agregados pétreos en la mezcla y luego se sustituirán tres porcentajes distintos (3%, 5% y 10%) del peso de los agregados pétreos por plástico HDPE en las mezclas asfálticas modificadas para la evaluación del desempeño y serán considerados en unidades porcentuales (%).

4.2.2.2 Porcentajes de agregados pétreos

A partir del diseño de la mezcla asfáltica se determinará el porcentaje óptimo de asfalto y agregados pétreos en la mezcla para la evaluación del desempeño y el porcentaje de agregados serán considerados en unidades porcentuales (%).

El diagrama mostrado en la ilustración 3 describe la manera en que el porcentaje de agregados con y sin plástico HDPE (variables independientes) afecta el desempeño y el costo directo de las mezclas asfálticas modificadas y no modificadas (variables dependientes).

4.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS APLICADOS

Debido a las condiciones actuales de pandemia por el coronavirus COVID-19, que exige el distanciamiento social fue necesario utilizar los resultados obtenidos por los alumnos del laboratorio de Vías de Comunicación para los ensayos de granulometría y peso específico de agregados pétreos, así como el resultado del ensayo de ductilidad del cemento asfáltico. Los ensayos de laboratorio necesarios para el desarrollo de la presente investigación se realizaron de acuerdo al orden de información requerida de las propiedades de los materiales utilizados, como ser el ensayo de granulometría de los agregados pétreos para poder realizar los ensayos Marshall en las mezclas asfálticas, como se muestra a continuación.

Tabla 9 Diagrama de flujo de ensayos realizados en la investigación



4.3.1 ENSAYO DE GRANULOMETRÍA DE AGREGADOS PÉTREOS

Los datos fueron obtenidos por medio del ensayo de granulometría mecánica del agregado grueso (grava) y fino (arena) utilizando la tamizadora mecánica y los tamices de acuerdo con la norma ASTM C 136-01, descrita en la sección 3.4.2.1 del presente informe.

El instrumento utilizado se denomina tamizadora mecánica y se muestra en la ilustración 4.



Ilustración 3 Tamizadora mecánica

4.3.2 ENSAYO DE PENETRACIÓN

El ensayo de penetración se realizó con el fin de evaluar la calidad del CA a ser utilizado en las mezclas asfálticas, modificadas y no modificadas, para lo que se utilizó el penetrómetro y la aguja calibrada de acuerdo con la norma ASTM D5-06, descrita en la sección 3.4.2.2 del presente informe.

El instrumento utilizado se denomina penetrómetro y sirve para liberar la aguja de ensayo de manera controlada sobre la muestra de CA a ensayar. Consta de una base metálica que está sujeta a un tubo de apoyo vertical que permite ajustar la altura de la aguja de ensayo y en la parte superior posee la escala de medición de la penetración como se muestra en la ilustración 5.



Ilustración 4 Penetrómetro

4.3.3 ENSAYO DE DUCTILIDAD

Al igual que el ensayo de penetración, se realizó el ensayo de ductilidad de materiales bituminosos con el fin de evaluar la calidad del CA a utilizar en la elaboración de mezclas asfálticas, utilizando los moldes de latón para la elaboración de las briquetas y el ductilómetro para poder medir la distancia de elongación máxima de las briquetas de acuerdo con la norma ASTM D 113-07, descrita en la sección 3.4.2.3 del presente informe.



Ilustración 5 Ductilómetro

4.3.4 ENSAYO MARSHALL

El ensayo de resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas usando el aparato Marshall se realizó de acuerdo a lo indicado por la norma ASTM D1559-76. Para el ensayo se utilizó el aparato Marshall (ilustración 6) que realiza la prueba de estabilidad en los distintos especímenes elaborados para la investigación, el aparato de compactación con martillo de 10 lb (ilustración 9) para la compactación por ambas caras de todos los especímenes ensayados, una bomba de vacío y picnómetro (ilustración 7) para poder retirar las burbujas de aire en la determinación del peso específico de los agregados, una balanza y un calentador de agua (ilustración 10) para poder reposar los especímenes en baño maría previo al ensayo en el aparato Marshall.



Ilustración 6 Aparato Marshall



Ilustración 7 Picnómetro y equipo de protección utilizado en ensayo Marshall



Ilustración 8 Compresor de aire



Ilustración 9 Compactadora de 10 lb



Ilustración 10 Calentador de agua

El primer ensayo se realizó con el fin de determinar el porcentaje óptimo de CA en la mezcla asfáltica a utilizar para la elaboración de las mezclas no modificadas y de las mezclas modificadas. Una vez determinado el contenido de óptimo de CA, se realizó una serie de ensayos Marshall en las mezclas asfálticas modificadas con HDPE como sustituto porcentual de los agregados pétreos y las no modificadas, con el fin de evaluar su desempeño. Finalmente se verificó el contenido óptimo de asfalto en la mezcla asfáltica modificada con HDPE con el mejor desempeño de los tres porcentajes utilizados (3%, 5% y 10%).

4.3.5 CÁLCULOS Y TABULACIÓN DE DATOS

Microsoft Excel o simplemente Excel es un software de aplicación producto de la empresa Microsoft, que brinda soporte digital a las labores contables, financieras, organizativas y de programación, mediante hojas de cálculo.

Es una aplicación versátil y útil sobre todo para elaborar tablas, gráficas y otras operaciones de representación de la información, a partir de una matriz virtualmente infinita de filas y columnas en las que pueden introducirse y personalizarse los datos. Además, Excel cuenta con un sistema de macros o fórmulas automatizadas, que permiten también su empleo con fines de algoritmos y programación.

Excel fue utilizado en la investigación para el registro y tabulación de los datos de los ensayos de laboratorio, para el cálculo de los resultados de los ensayos haciendo uso de fórmulas programadas y la representación gráfica de los resultados.



Ilustración 11 Logo de MS Excel

4.4 MATERIALES

4.4.1 CEMENTO ASFÁLTICO

Como se mencionó anteriormente, el cemento asfáltico es un material bituminoso que actúa como ligante de los agregados pétreos en las mezclas asfálticas en caliente. El CA fue proporcionado por el laboratorio de ingeniería civil de UNITEC y se evaluó su calidad y consistencia en el ensayo de penetración según lo descrito anteriormente.



Ilustración 12 Cemento asfáltico utilizado

4.4.2 AGREGADOS PÉTREOS

Se entiende por agregados pétreos al conjunto de partículas inertes de gravas, arenas, finos y *filler*, naturales o triturados. Al igual que el CA, los agregados pétreos fueron proporcionados por el laboratorio de Ingeniería Civil.



Ilustración 13 Agregados pétreos utilizados

4.4.3 HDPE

El HDPE utilizado en los ensayos de mezclas modificadas fue proporcionado por el ingeniero Jean Vassilou gerente de la empresa Reciclajes de Honduras. EL HDPE utilizado es un producto reciclado y triturado en pequeñas virutas, listo para ser empleado en la fabricación de nuevos productos, con un peso específico de 0.925 g/cm^3 y una temperatura de fusión de $190 \text{ }^\circ\text{C}$.



Ilustración 14 HDPE utilizado en investigación

Fuente: freepikcompany (2021)

4.5 METODOLOGÍA DE ESTUDIO

4.5.1 PROCEDIMIENTOS MECÁNICOS

Los ensayos de laboratorio realizados en el cemento asfáltico y las mezclas asfálticas, desarrollados de acuerdo a las normas ASTM que los regulan, constituyen los procedimientos mecánicos de la investigación. Inicialmente se realizaron los ensayos de penetración y ductilidad para la evaluación de la calidad del cemento asfáltico utilizado en la elaboración de las mezclas asfálticas y su clasificación de acuerdo al Manual de Carreteras de Honduras. Posteriormente se realizó el ensayo Marshall para la determinación del contenido óptimo de asfalto a utilizar en la elaboración de las mezclas asfálticas modificadas y no modificadas. Finalmente se desarrolló el ensayo Marshall en las mezclas asfálticas modificadas y no modificadas con el fin de determinar y comparar su desempeño.

4.5.1.1 Clasificación de los agregados pétreos

El ensayo de clasificación por tamizado de los agregados pétreos se realizó de acuerdo a lo indicado en la norma ASTM C 136-01, haciendo uso de los tamices para determinar la distribución por tamaño de las partículas de los agregados gruesos y finos. Inicialmente se realizó un cuarteo del agregado grueso y fino hasta obtener una muestra representativa de 3,000g y 500g respectivamente. Para el tamizado de los agregados gruesos fueron utilizados los tamices de 2", 1 ½", 1", ¾", ½", 3/8", #4 y #8, agitados por 15 minutos en la máquina tamizadora. El mismo proceso se realizó en el agregado fino, con la diferencia de que se utilizaron los tamices de 3/8", #4, #8, #16, #30, #50, #100 y #200. Finalmente se registró el peso retenido para el agregado grueso y fino para poder calcular el porcentaje de retenido acumulado y el porcentaje de pase.

4.5.1.2 Determinación de la dureza del cemento asfáltico por norma ASTM D-

15

El ensayo de penetración se realizó de acuerdo a lo indicado en la norma ASTM D-15, donde se indica el uso de 100 g de asfalto que fue calentado hasta poder ser vertido en una lata metálica que posteriormente fue colocada en una bandeja con agua, con el fin de llevar el asfalto a una temperatura de 25°C para poder ser ensayado (ilustración 16).



Ilustración 15 Reducción de la temperatura del asfalto

Finalmente se realizó el ensayo con la máquina de penetración, colocando la aguja de penetración a una distancia mínima de la superficie del asfalto. Una vez calibrada la máquina para la medición de la penetración, se dejó caer libremente la aguja por cinco segundos, se registró la altura de

penetración y se repitió el proceso cinco veces con el cuidado de mantener limpia la aguja de penetración.

4.5.1.3 Ensayo de ductilidad

El ensayo de ductilidad se realizó de acuerdo a lo indicado en la norma ASTM D 113 – 0, donde se indica como primer paso de procedimiento el calentamiento del asfalto a ensayar hasta poder ser vertido en los moldes normalizados para la elaboración de las tres briquetas de ensayo. Posteriormente se dejaron reposar por 35 minutos para que se enfriaran a temperatura ambiente. Luego se procedió a preparar el baño de agua, agregando el aditivo de ajuste de gravedad específica (sal) y a ajustar la temperatura de ensayo del agua a 25 °C. Pasados los 35 minutos de reposo se separó la muestra de la placa de latón con el cuidado de no deformarla y se colocó dentro del aparato de ensayo (ductilómetro) por 90 minutos previo a ser ensayada.

Finalmente se realizó el ensayo tirando de los extremos de los moldes en el ductilómetro a la velocidad (5 cm/min) y temperatura especificadas hasta que los especímenes se rompieron, midiéndose desde el extremo de inicio la distancia (cm) a la que ocurrió la ruptura.



Ilustración 16 Ductilómetro

4.5.1.4 Determinación del contenido óptimo de asfalto utilizando el ensayo Marshall

El procedimiento de ensayo Marshall para la determinación del contenido óptimo de asfalto se realizó de acuerdo a lo indicado en la norma ASTM D1559-76, iniciando con la preparación de los agregados pétreos. Para la preparación de los agregados fue necesario determinar la granulometría que fue proporcionada por los alumnos de laboratorio de estructuras de concreto. Con estos datos se determinó el tamaño máximo del agregado y posteriormente el peso de los agregados necesarios para cada porcentaje de asfalto a ensayar (4%, 5%, 6%, 7% y 8%). Se pesó la cantidad de arena, grava y filler necesarios para la elaboración de dos especímenes de ensayo por cada porcentaje como se muestra en la ilustración 19, luego se colocaron las diferentes cantidades de agregados de acuerdo al porcentaje de asfalto a ensayar en recipientes para poder ser ingresados al horno durante 24 horas.



Ilustración 17 Agregados para ensayo Marshall

Pasadas las 24 horas en el horno, se realizó el ensayo Marshall en cada uno de los porcentajes a ensayar. Se agregó el peso del asfalto a los agregados con la ayuda de una balanza colocada lo más cercano posible a las hornillas con el fin de realizar el proceso de mezclado sobre una superficie caliente. Una vez se logró una consistencia homogénea del asfalto en la mezcla, se vertió dentro del molde de compactación.

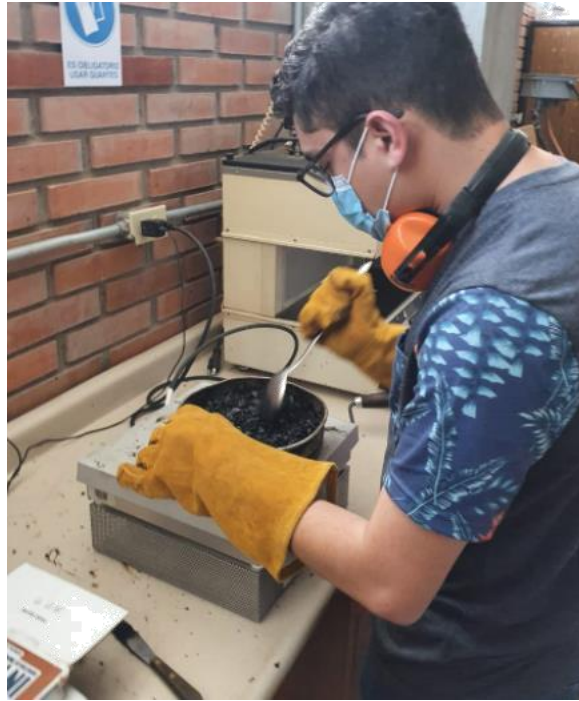


Ilustración 18 Proceso de mezclado

Luego de ser vertido en los moldes de compactación, se procedió a introducir los moldes en la máquina compactadora, aplicando 75 golpes por cada cara del espécimen como requisito de mezclas de alto tráfico. Y finalmente se dejó reposar el espécimen por otras 24 horas, previo a su ensayo en la maquina Marshall.



Ilustración 19 Mezclas asfálticas en reposo

Para la determinación de la gravedad específica de la mezcla suelta se pesó el sobrante de la mezcla asfáltica vertida en los moldes de compactación. Luego se calibró el picnómetro hasta la marca de 600 ml para el registro del peso del picnómetro más el agua y se colocó la mezcla dentro del picnómetro ahora con agua hasta la mitad del contenido de calibración. Se procedió a retirar los

vacíos de aire de la mezcla con el compresor de aire durante 15 minutos y finalmente se registró el peso del picnómetro lleno hasta la marca de calibración con la mezcla suelta.



Ilustración 20 Retirado de vacíos en mezcla suelta

Luego de 24 horas de reposo de los especímenes de ensayo, se procedió a determinar la gravedad específica de las pastillas compactadas. Se registró el peso al aire de cada pastilla y luego el peso sumergido.



Ilustración 21 Peso sumergido de pastillas compactadas

Finalmente se ensayó cada pastilla en la maquina Marshall, iniciando con la inmersión de las pastillas en agua a la temperatura indicada en la norma del ensayo de 60°C durante 30 minutos. Luego se procedió a secar la superficie de la pastilla y se colocó dentro de la maquina Marshall para aplicar carga hasta provocar la falla y registrar la carga máxima y deformación.



Ilustración 22 Aplicación de carga en máquina Marshall

4.5.1.5 Ensayo Marshall en mezclas asfálticas no modificadas

Con el porcentaje óptimo de asfalto determinado en el ensayo Marshall (5.27 %) se determinó el peso de los agregados de acuerdo al contenido de asfalto, para la elaboración de las mezclas no modificadas. Se elaboraron y ensayaron 3 pastillas no modificadas de acuerdo a lo indicado por la norma ASTM D1559-76, como se describe en la sección 4.5.1.4 del presente informe.

4.5.1.6 Ensayo Marshall en mezclas asfálticas modificadas con HDPE

Una vez determinado el contenido óptimo de asfalto (5.27 %) para los ensayos Marshall en mezclas asfálticas modificadas, se determinó el peso por agregados de acuerdo al contenido de asfalto, restando el contenido de grava y arena por HDPE en la mezcla de manera proporcional a la distribución granulométrica determinada previamente. Luego de mezclar los agregados, incluyendo el HDPE, se procedió a repetir el procedimiento de ensayo Marshall como se describió anteriormente para 3%, 5% y 10% de sustitución porcentual de agregados pétreos, elaborándose 3 pastillas por cada porcentaje.

4.5.2 PROCEDIMIENTOS DE CÁLCULO PARA CALIFICAR EL CEMENTO ASFÁLTICO

Haciendo uso del software de aplicación Excel se realizaron los procedimientos de tabulación de datos que fueron organizados de acuerdo al ensayo realizado y en orden lógico para posteriormente poder realizar los cálculos de manera programada para cada ensayo, la tabulación de resultados y finalmente su representación gráfica. A continuación, se ilustra el procedimiento de cálculo para cada ensayo.

4.5.2.1 Penetración

De los cinco datos obtenidos en el ensayo (tabla 10) se calculó la penetración promedio como se muestra.

Tabla 10 Datos de ensayo de penetración

Datos del ensayo		
Núm. De penetración	Dato (0.1 mm)	Dato (mm)
1	58	5.8
2	47	4.7
3	47	4.7
4	54	5.4
5	44	4.4
$(1 + 2 + 3 + 4 + 5)$		

Ecuación 1 Penetración promedio

4.5.2.2 Ductilidad

Para el ensayo de ductilidad se elaboraron tres briquetas de ensayo que fueron estiradas a una velocidad de 5 cm/min y una temperatura de 25 °C de acuerdo a lo indicado por la norma ASTM D 113-0, observándose una distancia de ruptura de 100 cm para las tres briquetas ensayadas, como se muestra en la tabla 11.

Tabla 11 Datos de ensayo de ductilidad

Datos del ensayo	
Núm. De espécimen	Dato (cm)
1	105
2	105
3	105

4.5.3 PROCEDIMIENTOS DE CÁLCULO PARA MEZCLAS NO MODIFICADAS

Para las mezclas asfálticas no modificadas se realizaron los procedimientos de cálculo y tabulación de datos del ensayo Marshall en el software de aplicación Excel, en el orden indicado por el Manual de Laboratorio de Vías de Comunicación, para posteriormente poder realizar los cálculos de manera programada, la tabulación de resultados y finalmente su representación gráfica. A continuación, se ilustra el procedimiento de cálculo para la determinación del contenido óptimo de asfalto y la evaluación del desempeño de las mezclas no modificadas usando la máquina Marshall.

4.5.3.1 Determinación del contenido óptimo de asfalto utilizando el ensayo Marshall

Como primer paso de cálculo se utilizaron los datos de granulometría de los agregados que fueron proporcionados por los alumnos de laboratorio de concreto, necesarios para determinar el tamaño máximo del agregado y posteriormente los límites de porcentaje de pase de los agregados, como se muestra en la tabla 12.

Tabla 12 Límites de granulometría de acuerdo a tamaño máximo

Tamaño del Tamiz	Designación de la mezcla y Tamaños Máximos Nominales del Agregado				
	37.5mms (1 ½")	25.0 mms (1")	19.0 mms (¾")	12.5 mms (½")	9.5 mms (⅜")
	Porcentaje Total que Pasa (por Peso)				
50.0 mms (2")	100	-	-	-	-
37.5 mms (1 ½")	90-100	100	-	-	-
25.0 mms (1")	-	90-100	100	-	-
19.0 mms (¾")	56-80	-	90-100	100	-
12.5 mms (½")	-	56-80	-	90-100	100
9.50 mms (⅜")	-	-	56-80	-	90-100
4.75 mms (#4)	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85
2.36 mms (#8)	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67
1.18 mms (#16)	-	-	-	-	-
0.60 mms (#30)	-	-	-	-	-
0.30 mms (#50)	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23
0.15 mms (#100)	-	-	-	-	-
0.075 mms (#200)	0-5	1-7	2-8	2-10	2-10
Cemento Asfáltico, porcentaje en peso de la Mezcla Total	3-8	3-9	4-10	4-11	5-12

Fuente: Manual de Laboratorio de Vías de Comunicación

Existen dos designaciones para el tamaño máximo de los agregados, la primera de acuerdo a el tamiz de abertura más pequeña por donde pasa el 100% de los agregados (tamaño máximo absoluto) y la segunda de acuerdo a el tamiz de abertura más grande que retiene no más del 10% de las partículas gruesas (tamaño máximo nominal). De acuerdo a esos los dos criterios mencionados y la granulometría de los agregados, se determinó el tamaño máximo de los agregados como ¾". Luego con los límites establecidos en la tabla 13, se procedió a elaborar la tabla de clasificación de los agregados (tabla 14) y la tabla de porcentajes ideales para arena, grava y filler (tabla 9).

Tabla 13 Clasificación de los agregados

Granulometría				Límites establecidos en base al tamaño máximo		
Tamiz	Tamaño del Tamiz	Granulometría Gruesa	Granulometría Fina	Límite Superior	Límite Inferior	Filler
	mm	%Pase	%Pase	%Pase	%Pase	%Pase
1"	25	100	100	100	100	100
3/4"	19	97.98	100	90	100	100
3/8"	9.5	56.76	99.61	56	80	100
#4	4.75	12.99	84.42	35	65	100
#8	2.36	4.17	50.49	23	49	100
#50	0.3	0	7.89	5	19	100
#200	0.075	0	1.35	2	8	75

Tabla 14 Porcentajes ideales de agregados

Tamiz	Gruesa %	Fina %	Filler (2 a 5)%	Fina + Gruesa
	52	48	3	%Pase
1"	50.44	46.56	3.00	100.00
3/4"	49.42	46.56	3.00	98.98
3/8"	28.63	46.38	3.00	78.01
#4	6.55	39.31	3.00	48.86
#8	2.10	23.51	3.00	28.61
#50	0.00	3.67	3.00	6.67
#200	0.00	0.63	2.25	2.88

Luego se procedió a calcular el peso de los materiales a utilizar por cada pastilla de 1,200 gramos a ensayar. Se ensayaron 5 porcentajes distintos de asfalto (4%, 5%, 6%, 7% y 8%) elaborándose 2 pastillas por cada porcentaje, por lo que fue necesario determinar el peso de los materiales para cada porcentaje como se ejemplifica en tabla 15.

Tabla 15 Masa de los materiales para 4% de asfalto

Masa probeta		1200	gramos
Material	% Por peso del agregado	% Por peso de la mezcla	Pesos por material (gr.)
Asfalto	4	3.85	46.15
Grava	50.44	48.50	582.00
Arena	46.56	44.77	537.23
Filler	3	2.88	34.62
Total	104	100.000	1200.00

Posterior a la elaboración de las pastillas, se determinó la gravedad específica de las pastillas compactadas y de la mezcla suelta como se muestra a continuación.

Ecuación 2 Gravedad específica de las pastillas compactadas (Gmb)

Ecuación 3 Gravedad específica de la mezcla suelta (Gmm)

Donde W_a es el peso al aire y W_s es el peso sumergido para las pastillas compactadas y W_m el peso del material, W_{p+a} el peso del picnómetro más agua y W_{p+a+m} el peso del picnómetro más agua y material para la mezcla suelta, todo en gramos.

Luego se determinó el peso específico de los agregados (tabla 16), facilitado por los alumnos de laboratorio de estructuras de concreto como se mencionó anteriormente y el peso por material para cada porcentaje de asfalto, como se ejemplifica para el 4% de asfalto en tabla 17.

Tabla 16 Peso específico de los materiales

Peso específico	g/cm^3
G1 (grava)	2.74
G2 (arena)	2.54
G3 (filler)	2.65
Gb (asfalto)	1.01

Tabla 17 Peso por material de mezcla

Material	% por peso del agregado	% Por peso de la mezcla
Asfalto (P_b)	4	3.85
Grava (P_1)	50.44	48.50
Arena (P_2)	46.56	44.77
Filler (P_3)	3	2.88
Total	104	100.000

Como se muestra en la ecuación 4, se debe determinar el peso de los agregados para cada porcentaje de asfalto ensayado, siendo grava (P_1), arena (P_2) y filler (P_3).

Ecuación 4 Peso de los agregados

El peso específico Bulk (G_{sb}) relaciona el peso de los agregados con el peso específico de cada uno, como se muestra en la ecuación 5.

$$G_{sb} = \frac{1 + 2 + 3}{\left(\frac{1}{G_1} + \frac{2}{G_2} + \frac{3}{G_3} \right)}$$

Ecuación 5 Gravedad específica Bulk (Gsb)

Para el cálculo del peso específico efectivo es necesario haber determinado previamente el peso del asfalto (Pb), el peso específico del asfalto y la gravedad específica de la mezcla suelta (Gmm).

$$Gse = \frac{100}{\left(\frac{Pb}{Gsb} + \frac{100 - Pb}{Gmm} \right)}$$

Ecuación 6 Peso específico efectivo (Gse)

Posteriormente se determinó el porcentaje de asfalto absorbido por el agregado (Pba), con los valores de peso específico Bulk (Gsb) y el peso específico efectivo (Gse) calculados previamente.

$$Pba = 100 * \frac{Gsb - Gse}{Gsb}$$

Ecuación 7 Asfalto absorbido por el agregado (Pba)

El contenido efectivo de asfalto en la mezcla (Pbe) fue determinado utilizando el porcentaje de asfalto absorbido por el agregado, el peso del asfalto y el peso de los agregados, como se muestra en la ecuación 8.

$$Pbe = Pb - 100 * \frac{Pba}{100}$$

Ecuación 8 Contenido efectivo de asfalto en la mezcla

Posteriormente se determinó el porcentaje de vacíos de agregado mineral (VMA) con los valores de la gravedad específica de la mezcla compactada (Gmm), el peso específico Bulk (Gsb) y el peso de los agregados (Ps).

$$VMA = 100 * \left(\frac{Gsb}{Gmm} - \frac{Ps}{100} \right)$$

Ecuación 9 Porcentaje de vacíos de agregado mineral

$$Pa = 100 * \frac{VMA}{100}$$

Ecuación 10 Porcentaje de vacíos llenos de aire de la mezcla compactada

Finalmente se calculó la estabilidad corregida de acuerdo a la tabla 18, que relaciona la altura de cada probeta con un factor de corrección y se determinó el flujo registrado en la máquina Marshall en centésimas de pulgada. Los valores mostrados en tabla 18 forman parte del rango de espesores medidos en los distintos ensayos, la tabla completa puede ser consultada en la sección de anexos del presente informe.

Ecuación 11 Estabilidad corregida

Tabla 18 Factor de corrección de estabilidad

Valores de corrección de estabilidad por espesor aproximado de especímenes	
Espesor aproximado de espécimen (mm)	Valor de corrección por correlación
57.2	1.19
58.7	1.14
60.3	1.09
61.9	1.04
63.5	1.00

Fuente: (ASTM International, 1976)

Con los valores de asfalto correspondientes de estabilidad máxima, gravedad específica máxima y el valor de 4% de vacíos en las gráficas elaboradas, se determinó el porcentaje óptimo de asfalto como un promedio de los tres valores de asfalto.

$$\% \text{ ó } = \% + \% + \frac{\%}{(4\%)^3}$$

Ecuación 12 Contenido óptimo de asfalto

En la tabla 16 se observan los valores de porcentaje de asfalto correspondientes a estabilidad máxima, gravedad específica y porcentaje de vacíos de 4% determinados a partir de las gráficas de cada uno para el cálculo del porcentaje óptimo de asfalto como el promedio de los tres valores de asfalto que se muestran.

Tabla 19 Contenido óptimo de asfalto

Criterio	% Asfalto
Estabilidad	5.20%
Gravedad específica	6.00%
Porcentaje de vacíos del 4%	4.60%
% Óptimo de asfalto	5.27%

1.1.1 PROCEDIMIENTOS DE CÁLCULO PARA MEZCLAS MODIFICADAS

A diferencia del procedimiento de cálculo del contenido óptimo de asfalto utilizando el ensayo Marshall, para la sustitución de agregados pétreos por polímeros se incluyó un nuevo peso específico en las ecuaciones mostradas anteriormente, se modificó el porcentaje de peso de la grava y la arena para la elaboración de las mezclas y se utilizaron los mismos límites de granulometría establecidos por el tamaño máximo del agregado grueso.

4.5.3.2 Sustitución porcentual de agregados pétreos por polímeros

En primer lugar, se procedió a calcular el peso de los materiales a utilizar por cada pastilla de 1,200 gramos a ensayar, utilizando el porcentaje de óptimo de asfalto determinado anteriormente (5.27 %) y modificando el porcentaje de grava y arena por polietileno de manera proporcional a los porcentajes ideales establecidos en la tabla 9 del presente informe. A continuación, se ejemplifica la relación utilizada para encontrar el valor de sustitución equivalente de grava (52 %) por polietileno (3 %).

$$\frac{3}{100} = \frac{52}{100}$$

Ecuación 13 Porcentaje de sustitución equivalente de grava

Posteriormente se determinó el peso de los agregados, restando el equivalente de sustitución por polietileno a la grava y arena como se muestra en la tabla 20 para el 3% de polietileno.

Tabla 20 Masa de los materiales para 3% de polietileno

Masa probeta		1200	gramos
Material	% por peso del agregado	% Por peso de la mezcla	Pesos por material (gr.)
Asfalto	5.27	5.01	60.07
Grava	48.88	46.43	557.20
Arena	45.12	42.86	514.33
Filler	3	2.85	34.20
Polietileno	3	2.85	34.20
Total	105.27	100.000	1200.00

Posterior a la elaboración de las pastillas, se determinó la gravedad específica de las pastillas compactadas y de la mezcla suelta como se muestra en ecuación 2 y 3 de la sección 4.5.2.3 del presente informe. Luego se incorporó el peso específico del polietileno como se muestra en la tabla 14 y se determinó el peso por material para cada porcentaje de polietileno a ensayar (3%, 5% y 10%).

4.5.3.3 Determinación del desempeño de mezclas asfálticas modificadas

Tabla 21 Peso específico de los materiales con HDPE

Peso específico	g/cm^3
G1 (grava)	2.74
G2 (arena)	2.54
G3 (filler)	2.65
G4 (HDPE)	0.93
Gb (asfalto)	1.01

Tabla 22 Peso por material de mezcla modificada (3% HDPE)

Material	% por peso del agregado	% Por peso de la mezcla
Asfalto (P _b)	5.27	5.01
Grava (P ₁)	48.88	46.43
Arena (P ₂)	45.12	42.86
Filler (P ₃)	3	2.85
HDPE (P ₄)	3	2.85
Total	105.27	100.00

Como se muestra en la ecuación 14, se debe determinar el peso de los agregados (incluyendo HDPE para cada porcentaje de asfalto ensayado, siendo grava (P₁), arena (P₂), filler (P₃) y HDPE (P₄).

Ecuación 14 Peso de los agregados

El peso específico Bulk (Gsb) relaciona el peso de los agregados con el peso específico de cada uno, como se muestra en la ecuación 15.

$$Gsb = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4}{\left(\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3} + \frac{P_4}{G_4} \right)}$$

Ecuación 15 Gravedad específica Bulk (Gsb)

Al igual que en la sección 4.5.3.1 del presente informe, para el cálculo del peso específico efectivo es necesario haber determinado previamente el peso del asfalto (P_b), el peso específico del asfalto y la gravedad específica de la mezcla suelta (Gmm).

$$Gse = \frac{100 - P_b}{\left(\frac{P_b}{G_b} + \frac{100 - P_b}{G_{mm}} \right)}$$

Ecuación 16 Peso específico efectivo (Gse)

Posteriormente se determinó el porcentaje de asfalto absorbido por el agregado (Pba), con los valores de peso específico Bulk (Gsb) y el peso específico efectivo (Gse) calculados previamente.

$$Pba = 100 * \frac{Gsb - Gse}{Gsb}$$

Ecuación 17 Asfalto absorbido por el agregado (Pba)

El contenido efectivo de asfalto en la mezcla (Pbe) fue determinado utilizando el porcentaje de asfalto absorbido por el agregado, el peso del asfalto y el peso de los agregados (incluyendo HDPE), como se muestra en la ecuación 8.

$$P_{be} = P_b - 100 * \frac{P_{ab}}{P_a}$$

Ecuación 18 Contenido efectivo de asfalto en la mezcla

Posteriormente se determinó el porcentaje de vacíos de agregado mineral (VMA) con los valores de la gravedad específica de la mezcla compactada (Gmm), el peso específico Bulk (Gsb) y el peso de los agregados (Ps).

$$VMA = 100 * \frac{G_{sb} - G_{mm}}{G_{sb}}$$

Ecuación 19 Porcentaje de vacíos de agregado mineral

$$P_a = 100 * \frac{P_s}{G_{sb}}$$

Ecuación 20 Porcentaje de vacíos llenos de aire de la mezcla compactada

Finalmente se calculó la estabilidad corregida de acuerdo a la tabla 13 mostrada en la sección 4.5.3.1 del presente informe, que relaciona la altura de cada probeta con un factor de corrección y se determinó el flujo registrado en la máquina Marshall en centésimas de pulgada.

$$S_c = S * C$$

Ecuación 21 Estabilidad corregida

4.5.3.4 Porcentaje óptimo de asfalto con 3% de polietileno

Con el objetivo de establecer una comparación a partir de los resultados de estabilidad, gravedad específica y porcentaje de vacíos obtenidos en función de los porcentajes de polietileno sugeridos por la literatura revisada (3%, 5% y 10%), de donde resultó que las mejores características corresponden a la sustitución porcentual de 3% de polietileno, 52% para la grava y 48% para la arena, se llevó a cabo el ensayo Marshall para determinar el contenido óptimo de asfalto para mezclas modificadas resultando los datos que muestra la tabla 23.

Tabla 23 Ensayo Marshall en mezclas modificadas con HDPE (3%)

% Asfalto	Estabilidad (lb)	Gmb (g/cm³)	Pa (%)
4%	340.93	2.07	10.74
5%	349.06	2.15	8.43
6%	428.28	2.09	9.25
7%	464.67	2.09	8.57
8%	347.19	2.05	9.35

De acuerdo a la estabilidad máxima, gravedad específica máxima y el menor porcentaje de vacíos, el porcentaje óptimo de asfalto se determinó utilizando los valores correspondientes de porcentaje de asfalto en las gráficas como se muestra en la tabla 24, mostrando una variación de 9% con respecto al porcentaje óptimo de asfalto para mezclas asfálticas no modificadas.

Tabla 24 Contenido óptimo de asfalto para mezclas modificadas con 3% de HDPE

Criterio	% Asfalto
Estabilidad	7.00%
Gravedad específica	5.00%
Porcentaje de vacíos del 4%	5.20%
% Óptimo de asfalto	5.73%

V RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 CALIFICACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO

Según American Standard Testing Materials el cemento asfáltico se califica en función de la norma ASTM D-15 que mide el grado de penetración y de la norma ASTM D 113 – 07 que determina la ductilidad. El cemento asfáltico utilizado para la investigación fue supuesto inicialmente como un AC-20 por viscosidad a 60 °C, por lo que fue necesario determinar su equivalente por grado de penetración para determinar si cumple con los requisitos mínimos de penetración y ductilidad.

5.1.1 ENSAYO DE PENETRACIÓN

En el ensayo realizado a la muestra de cemento asfáltico de acuerdo a lo indicado por la norma ASTM D-15, a 25 °C se obtuvieron los valores de penetración que se muestran en la tabla 25, siendo el grado de penetración el promedio de los valores de las cinco penetraciones realizadas, medidas en milímetros.

Tabla 25 Resultados de penetración

Datos del ensayo		
Penetración #	Lectura (0.1 mm)	Penetración (mm)
1	58	5.8
2	47	4.7
3	47	4.7
4	54	5.4
5	44	4.4
	Promedio	5

Se calculó el valor promedio de penetración resultando de 5 mm, inferior al valor mínimo esperado para un cemento asfáltico AC-20, utilizado normalmente para carpeta asfáltica, con un límite mínimo de penetración de 6 mm, por lo que se determina que la calidad del cemento asfáltico utilizado en el estudio es de menor calidad.

5.1.2 ENSAYO DE DUCTILIDAD

El ensayo de ductilidad realizado en el cemento asfáltico utilizado en la investigación fue realizado de acuerdo a lo indicado en la norma ASTM D113-07, a una velocidad constante de 5 cm/min y a una temperatura de 25 °C y se obtuvieron los valores que se muestran en la tabla 26, siendo la ductilidad el promedio de los tres valores registrados.

Tabla 26 Resultados de ensayo de penetración

Datos del ensayo	
Núm. De espécimen	Dato (cm)
1	105
2	105
3	105
Promedio	105

El valor promedio de ductilidad resultó en 105 cm, cumpliendo con el mínimo valor esperado para cementos asfálticos utilizados para carpetas asfálticas, incluido un cemento asfáltico AC-20, con un límite mínimo de ductilidad de 100 cm, por lo que se determina que el cemento asfáltico cumple con el requisito de calidad por ductilidad.

5.1.3 CALIFICACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO

Según lo indicado por el Reglamento Técnico Centroamericano en la guía de realización de ensayos y de clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados, los asfaltos a utilizar en pavimentos se pueden caracterizar por viscosidad a 60 °C, grado de penetración a 25 °C o por equivalencias entre grado de viscosidad y grado de penetración. El cemento asfáltico proporcionado por el laboratorio de ingeniería civil es un AC-20, de acuerdo a la viscosidad por lo que fue necesario determinar el cumplimiento de los parámetros de calidad de un AC-20 o su equivalente por grado de penetración, siendo un AC 60-70 como se muestra en la tabla 27.

Tabla 27 Determinación del grado de viscosidad de acuerdo con el grado de penetración

Grado de Penetración	Grado de Viscosidad AC (Asphalt Cement)
40-50	AC-40
60-70	AC-20
85-100	AC-10
120-150	AC-5
200-300	AC-2.5

Fuente: (Delgado, 2011)

De acuerdo a la tabla 28 de especificaciones para cementos asfálticos que se muestra, el cemento asfáltico ensayado no cumple con el requisito mínimo de penetración de 6 mm y cumple por el requisito mínimo de ductilidad de 100 cm, por lo que no se puede emplear en la elaboración de mezclas asfálticas para pavimentación, como se muestra en la tabla 24.

Tabla 28 Especificaciones para CA 60-70

	ESPECIFICACIONES PARA CEMENTOS ASFÁLTICOS									
	GRADO DE PENETRACIÓN									
	40 - 50		60 - 70		85 - 100		120 - 150		200 - 300	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Penetración a 25 C (77 F) 100g., 5 sec.....	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Punto de Inflamación, vaso abierto de Cleveland °F.....	450	-	450	-	450	-	425	-	350	-
Ductilidad a 25 C (77 F) 5 cm. por min., cm.....	100	-	100	-	100	-	100	-	-	-
Solubilidad en tricloro etileno, en %.....	99	-	99	-	99	-	99	-	99	-
Ensayo de película delgada en el horno 1/8 in. (3.2 mm), 163 C (325 F) 5 horas.....										
Pérdida por calentamiento, %.....	-	0.8	-	0.8	-	1.0	-	1.3	-	1.5
Penetración del residuo, % del original.....	58	-	54	-	50	-	46	-	40	-
Ductilidad del residuo a 25 C (77 F) 5 cm. por min., cm.....	-	-	50	-	75	-	100	-	100	-
Ensayo de la mancha (cuando y como se especifique, NOTA 1) con:										
- Solvente nafta standard										Negativo para todos los grados
- Solvente nafta standard, % de xileno										Negativo para todos los grados
- Solvente heptano xileno % xileno										Negativo para todos los grados

Fuente: (carreteras, Manual de carreteras tomo 5, 1996)

5.2 CLASIFICACIÓN DE LOS AGREGADOS PÉTREOS

Los agregados pétreos utilizados en una mezcla asfáltica son grava, arena y filler. Según la norma ASTM D1559-76 es necesario clasificar el tamaño máximo de la grava previo a determinar el porcentaje óptimo de asfalto para mezclas asfálticas.

5.2.1 GRANULOMETRÍA DE LOS AGREGADOS PÉTREOS

El ensayo de granulometría fue realizado utilizando una muestra de 3,000 gramos de acuerdo a lo indicado por la norma ASTM C 136 – 01 por los estudiantes del laboratorio de estructuras de concreto 1, brindando una tabla de resultados como se muestra.

Tabla 29 Resultados de granulometría

GRANULOMETRÍA			
Tamiz	Tamaño del Tamiz	Granulometría Gruesa	
	mm	%Pase	%Retenido
2"	50	100	0
1 1/2"	37.5	100	0
1"	25.4	100	0
3/4"	19.10	97.98	2.02
1/2"	12.7	78.65	21.35
3/8"	9.52	56.76	43.24
#4	4.75	12.99	87.01
#8	2.38	4.17	95.83
Fondo	0	0	4.17

5.2.1.1 Tamaño Máximo del Agregado Grueso

De la comparación de los resultados de la granulometría practicada a la grava y los criterios de designación de tamaño máximo nominal y absoluto indicados en la norma ASTM C136-01, se establece que el tamaño máximo absoluto resulta del número del tamiz por el que pasa el 100% del material y el tamaño máximo relativo resulta del número del tamiz en el que se retiene no más del 10% del agregado grueso. Cuando el porcentaje de retenido es menor al 10% para el tamaño máximo nominal, se considera igual al tamaño máximo absoluto y en caso de ser más del 10% se considera al tamaño máximo nominal como el tamaño máximo del agregado.

De acuerdo con los resultados de granulometría el tamaño máximo absoluto es de 1" y el tamaño máximo nominal es de 3/4", por lo que el tamaño máximo del agregado grueso es de 3/4".

5.3 PORCENTAJE ÓPTIMO DE ASFALTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS NO MODIFICADAS

De acuerdo con la norma ASTM D1559-76 el porcentaje óptimo de asfalto es determinado por el promedio del valor correspondiente de asfalto (%) del máximo valor de estabilidad (lb), la gravedad específica máxima de las pastillas compactadas (g/cm^3) y el valor correspondiente de asfalto (%) al 4% de vacíos de aire (Pa).

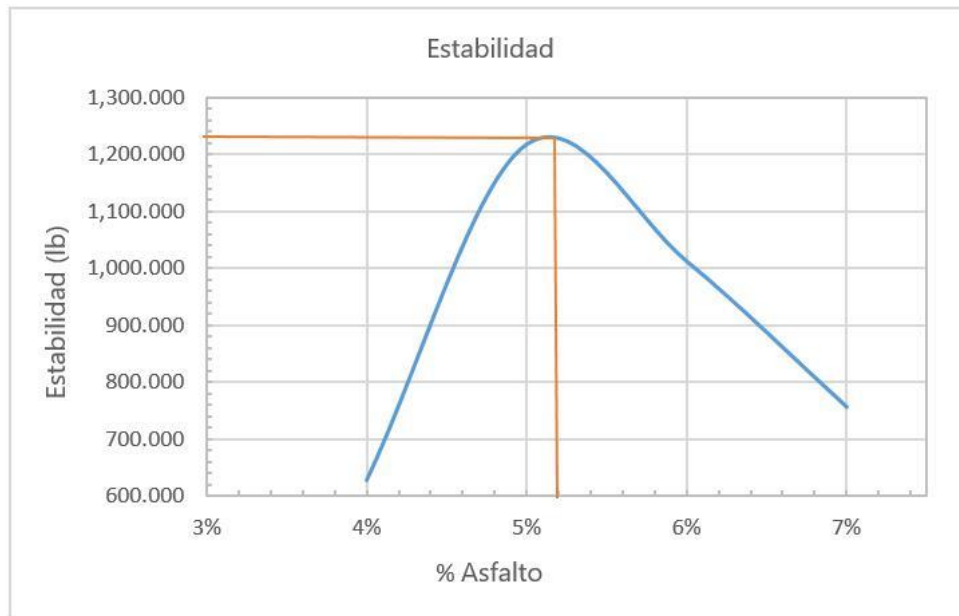


Ilustración 23 Estabilidad (lb)

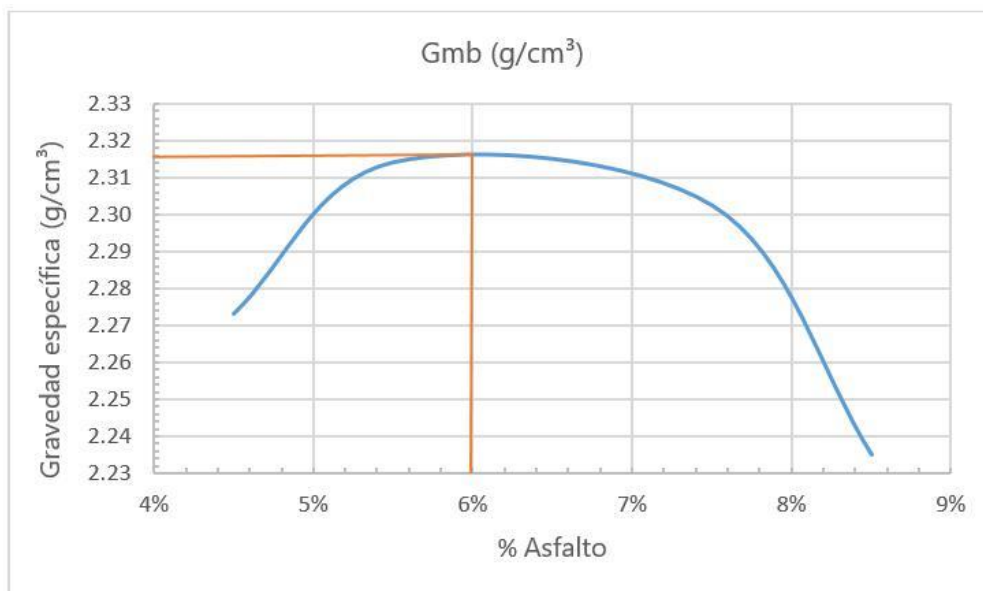


Ilustración 24 Gravedad específica de pastillas compactadas

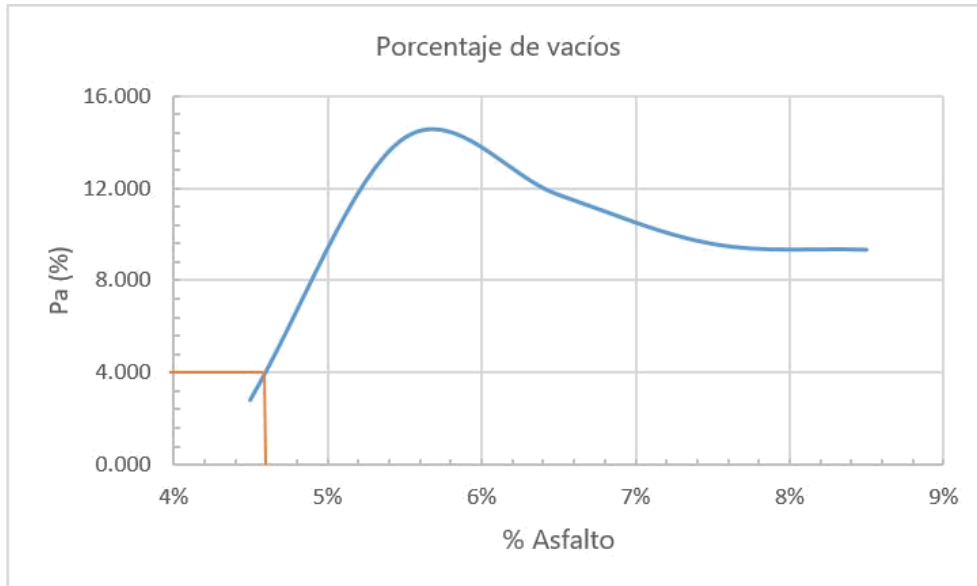


Ilustración 25 Porcentaje de vacíos

Debido a las restricciones por distanciamiento social que exige la pandemia del COVID-19, los valores de porcentaje de asfalto que se muestran en la tabla 30, son el promedio de los resultados de los tres ensayos Marshall realizados para la determinación del contenido óptimo de asfalto.

Tabla 30 Porcentaje óptimo de asfalto

Criterio	Porcentaje de asfalto (%)
% asfalto vs estabilidad	5.20%
% asfalto vs gravedad específica	6.00%
% asfalto vs porcentaje de vacíos	4.60%
% óptimo de asfalto	5.27%

De acuerdo a lo indicado por la norma ASTM D1559-76, se debe determinar el cumplimiento de los límites mostrados en la tabla 4 de la sección 3.4.1 del presente informe, para los valores de estabilidad, porcentaje de vacíos y flujo. Para el porcentaje óptimo de asfalto determinado, los valores mencionados se encuentran dentro de los límites establecidos para pavimentos de tráfico medio.

5.4 DESEMPEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS Y NO MODIFICADAS

Para poder realizar el análisis comparativo del desempeño de las mezclas asfálticas modificadas con HDPE y no modificadas, fue necesario determinar el porcentaje de HDPE que menos afecta el desempeño de las mezclas asfálticas modificadas, realizando el ensayo Marshall de acuerdo a lo indicado por la norma ASTM D1559-76, utilizando la estabilidad, peso específico y porcentaje de vacíos como criterios de comparación, como se muestra en la ilustración 26.

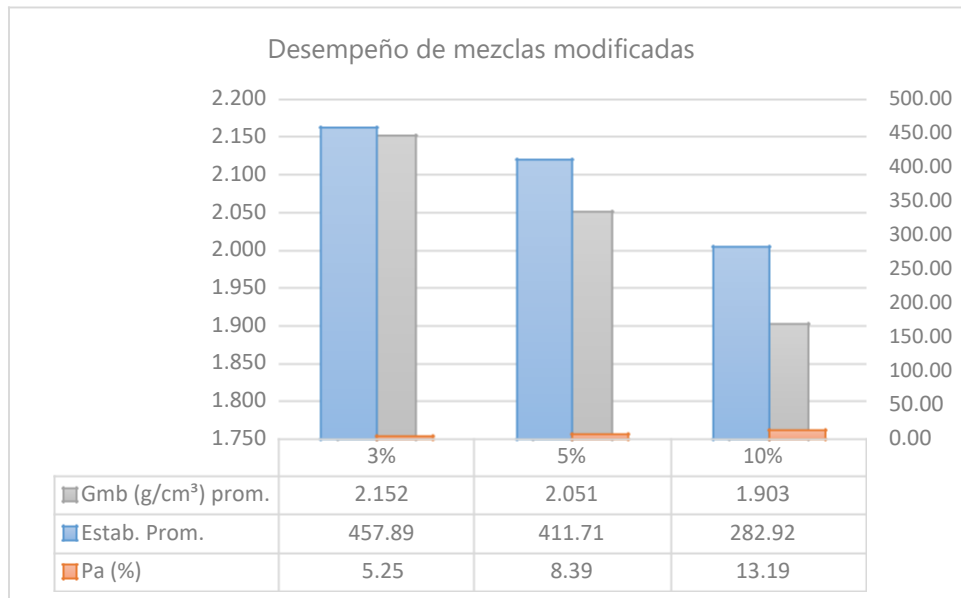


Ilustración 26 Desempeño de mezclas asfálticas modificadas con 3%, 5% y 10% de HDPE

Luego de determinarse la variación del porcentaje óptimo de mezclas asfálticas modificadas con HDPE (3% de sustitución de agregados) con respecto a las no modificadas de 9%, se compararon los valores de estabilidad, gravedad específica y porcentaje de vacíos de la mezcla asfáltica modificada con polietileno con los mejores resultados de los criterios antes mencionados (3% de HDPE) con las mezclas asfálticas no modificadas como se muestra en la tabla 31, descartándose los valores de desempeño para la primera pastilla modificada y no modificada en el cálculo del promedio de ambas debido a la desviación de los valores de desempeño con respecto a los demás.

Tabla 31 Comparación del desempeño de mezclas asfálticas no modificadas y modificadas

Mezclas asfálticas no modificadas			
% Asfalto	Estabilidad (lb)	Gmb (g/cm³)	Pa (%)
5.27%	791.75	2.28	1.51
5.27%	1,183.21	2.29	4.72
5.27%	1,182.62	2.26	5.01
Promedio	1,182.92	2.27	4.87
Mezclas asfálticas modificadas con 3% de HDPE			
3.00%	373.06	2.12	8.86
3.00%	408.35	2.15	3.03
3.00%	453.72	2.18	3.59
Promedio	431.03	2.17	3.31

A continuación, se muestra de manera gráfica, los resultados del desempeño de las mezclas asfálticas modificadas y no modificadas, mostrando una disminución de la estabilidad y gravedad específica de las mezclas asfálticas modificadas en comparación con las mezclas asfálticas no modificadas, así como una disminución en el porcentaje de vacíos.

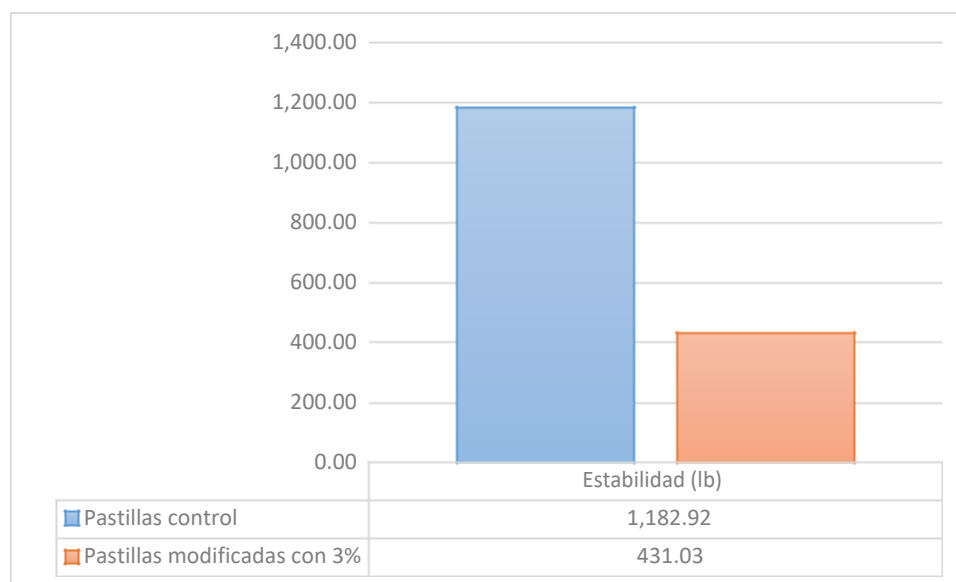


Ilustración 27 Comparación de estabilidad de mezclas modificadas y no modificadas

Las mezclas asfálticas modificadas con 3% de sustitución porcentual de agregados pétreos por 3% de HDPE muestran una disminución de estabilidad de 64% con respecto a las no modificadas.

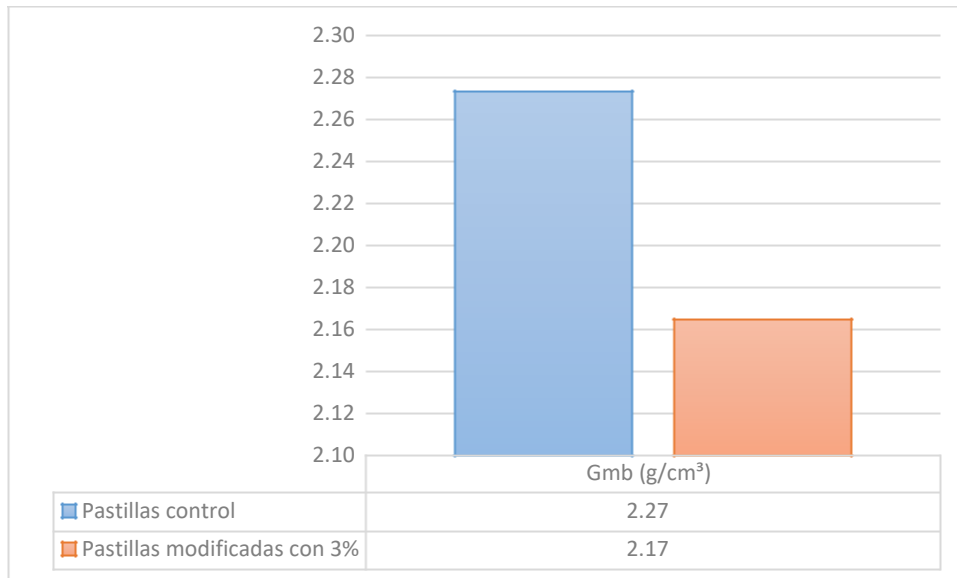


Ilustración 28 Comparación de gravedad específica de mezclas modificadas y no modificadas

Para la gravedad específica, las mezclas asfálticas modificadas con 3% de sustitución porcentual de agregados pétreos por 3% de HDPE muestran una disminución de 4.4% con respecto a las no modificadas.

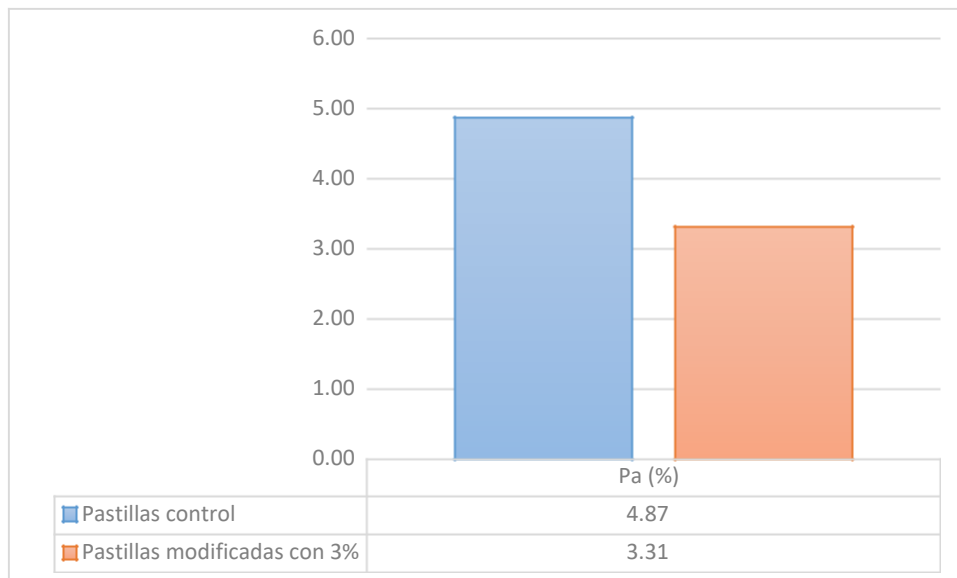


Ilustración 29 Comparación de porcentaje de vacíos de mezclas modificadas y no modificadas

Finalmente, las mezclas asfálticas modificadas con 3% de sustitución porcentual de agregados pétreos por 3% de HDPE muestran una disminución del porcentaje de vacíos de 47% con respecto a las no modificadas.

5.5 COSTO POR TONELADA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS Y NO MODIFICADAS

Para la determinación del costo por tonelada de mezclas asfálticas modificadas con HDPE y no modificadas se ha tomado en cuenta los precios y rendimientos utilizados por ASP Consultores que fueron proporcionados por la Ing. Luz Marina Funes y los precios vigentes establecidos por la Cámara Hondureña de la Industria de la Construcción. En virtud de lo anterior, es importante reconocer que los rendimientos y precios unitarios presentados son el fruto de años de experiencia y dedicación de colaboradores de ASP Consultores y de la Ing. Luz Marina, por lo que existe la posibilidad de que los precios por tonelada de las mezclas asfálticas que se presentan puedan variar en futuras investigaciones, con respecto a lo que se muestra en el presente documento.

Se han considerado como materiales al cemento asfáltico AC 20 por galón y los agregados pétreos por metro cúbico. Únicamente se muestra el precio unitario de la grava como agregado pétreo por considerarse la arena como un costo asociado a su extracción y traslado al sitio de la obra, puesto que ASP Consultores usualmente propone su explotación en bancos de arena cercanos a la obra, para la elaboración de la mezcla asfáltica. También se considera como material el asfalto diluido RC 250 por galón para la preparación de la superficie.

La mano de obra, con rendimiento medido en horas hombre (HRH), fue considerada en función de las tareas asociadas a cada etapa de elaboración y colocación de la mezcla asfáltica, por ejemplo, el motorista, mecánico y jefe de planta trituradora para la preparación y traslado de los agregados pétreos, para la elaboración de la mezcla es necesario contar con un jefe de planta asfáltica, operador de planta y encargado de asfaltos.

Finalmente, para el las herramientas y equipo, con rendimientos medidos en horas máquina (HRM), se consideró el equipo asociado para la elaboración de mezclas asfálticas de acuerdo a la tarea asociada al equipo como ser báscula y compresor para la elaboración de mezclas en planta, cargadora frontal, finisher y compactadora de rodillo para su colocación.

A continuación, se muestran las fichas de costos de mezclas modificadas con 3% de sustitución de agregados pétreos por HDPE, donde se incluye el precio del HDPE de 80 Lps/ton y las mezclas no modificadas. Las fichas de costos de las mezclas asfálticas modificadas con 5% y 10% de sustitución porcentual de agregados por HDPE pueden ser consultadas en la sección de anexos del presente documento.

Tabla 32 Ficha de costos unitarios de mezclas asfálticas no modificadas

Actividad: Carpeta Asfáltica (Producción, Colocación y Compactación)					
Unidad: TON				Precio	Costo
Descripción	Unidad	Cantidad	Producto (L.)		Total (L.)
1.	MATERIALES				
ASFALTO DILUIDO RC-250	GL	0.48648	49.934		24.292
LIGANTE ASFALTICO AC-20	GL	13.35460	46.043		614.883
GRAVA DE RIO	M3	0.42925	309.936		133.040
					772.215
2.	MANO DE OBRA				
AYUDANTE	HRH	0.03800	16.403		0.623
CHEQUEADOR	HRH	0.00950	15.746		0.150
CAPATAZ	HRH	0.01900	41.990		0.798
ENCARGADO DE ASFALTOS	HRH	0.00950	164.025		1.558
ELECTRICISTA	HRH	0.01900	32.805		0.623
JEFE DE PLANTA TRITURADORA	HRH	0.01420	147.662		2.097
JEFE DE PLANTA ASFALTICA	HRH	0.00950	209.952		1.995
MECANICO	HRH	0.01900	20.995		0.399
MOTORISTA	HRH	0.17100	20.995		3.590
OPERADOR DE EQUIPO PESADO	HRH	0.04750	25.312		1.202
OPERADOR DE PLANTA	HRH	0.01900	53.302		1.013
PEON	HRH	0.12350	16.403		2.026
					16.073
3.	HERRAMIENTA Y EQUIPO				
COMPRESOR I.R. 175CPM	HRM	0.00950	623.295		5.921
BASCULA	HRM	0.01900	918.540		17.452
CAMION DE PERSONAL	HRM	0.01900	406.782		7.729
PICK-UP	HRM	0.02850	393.660		11.219
CARGADOR FRONTAL DE 3 a 4 YD3	HRM	0.05680	1,115.370		63.353
ESPARCIDORA DE CONCRETO Y AGREGADOS	HRM	0.00950	557.685		5.298
COMPACTADORA VIBR. RODILLO LISO AUTOPROP.	HRM	0.02850	721.710		20.569
COMPACTADORA NEUMATICA	HRM	0.02850	721.710		20.569
TANQUE DISTRIBUIDOR DE ASFALTOS	HRM	0.00950	1,115.370		10.596
BARREDORA CATERPILLAR MOD. 246	HRM	0.00950	341.172		3.241
GRUPO ELECTROGENO	HRM	0.02840	656.100		18.633
PLANTA DE ASFALTO	HRM	0.00950	1,115.370		10.596
PLANTA TRITURADORA DE AGREGADO 90M3/HR	HRM	0.01420	2,361.960		33.540
FINISHER B.G. 270B, 187 HP, 337.7 CWT	HRM	0.00950	3,936.600		37.398
TRANSFORMADOR	HRM	0.04260	642.978		27.391
VOLQUETA DE 10 M3	HRM	0.08550	656.100		56.097
HERRAMIENTAS - %			6.00%		0.964
					350.566
			TOTAL		1,138.854

Tabla 33 Ficha de costos unitarios de mezclas asfálticas modificadas con 3% de HDPE

Actividad: Carpeta Asfáltica (Producción, Colocación y Compactación)					
Unidad: TON				Precio	Costo
Descripción	Unidad	Cantidad	Producto (L.)		Total (L.)
1.	MATERIALES				
ASFALTO DILUIDO RC-250	GL	0.48648	49.934		24.292
LIGANTE ASFALTICO AC-20	GL	13.35460	46.043		614.883
POLIETILENO DE ASLTA DENSIDAD (HDPE)	TON	0.02800	80.000		2.240
GRAVA DE RIO	M3	0.41637	309.936		129.049
					770.464
2.	MANO DE OBRA				
AYUDANTE	HRH	0.03800	16.403		0.623
CHEQUEADOR	HRH	0.00950	15.746		0.150
CAPATAZ	HRH	0.01900	41.990		0.798
ENCARGADO DE ASFALTOS	HRH	0.00950	164.025		1.558
ELECTRICISTA	HRH	0.01900	32.805		0.623
JEFE DE PLANTA TRITURADORA	HRH	0.01420	147.662		2.097
JEFE DE PLANTA ASFALTICA	HRH	0.00950	209.952		1.995
MECANICO	HRH	0.01900	20.995		0.399
MOTORISTA	HRH	0.17100	20.995		3.590
OPERADOR DE EQUIPO PESADO	HRH	0.04750	25.312		1.202
OPERADOR DE PLANTA	HRH	0.01900	53.302		1.013
PEON	HRH	0.12350	16.403		2.026
					16.073
3.	HERRAMIENTA Y EQUIPO				
COMPRESOR I.R. 175CPM	HRM	0.00950	623.295		5.921
BASCULA	HRM	0.01900	918.540		17.452
CAMION DE PERSONAL	HRM	0.01900	406.782		7.729
PICK-UP	HRM	0.02850	393.660		11.219
CARGADOR FRONTAL DE 3 ó 4 YD3	HRM	0.05680	1,115.370		63.353
ESPARCIDORA DE CONCRETO Y AGREGADOS	HRM	0.00950	557.685		5.298
COMPACTADORA VIBR. RODILLO LISO AUTOPROP.	HRM	0.02850	721.710		20.569
COMPACTADORA NEUMATICA	HRM	0.02850	721.710		20.569
TANQUE DISTRIBUIDOR DE ASFALTOS	HRM	0.00950	1,115.370		10.596
BARREDORA CATERPILLAR MOD. 246	HRM	0.00950	341.172		3.241
GRUPO ELECTROGENO	HRM	0.02840	656.100		18.633
PLANTA DE ASFALTO	HRM	0.00950	1,115.370		10.596
PLANTA TRITURADORA DE AGREGADO 90M3/HR	HRM	0.01420	2,361.960		33.540
FINISHER B.G. 270B, 187 HP, 337.7 CWT	HRM	0.00950	3,936.600		37.398
TRANSFORMADOR	HRM	0.04260	642.978		27.391
VOLQUETA DE 10 M3	HRM	0.08550	656.100		56.097
HERRAMIENTAS - %			6.00%		0.964
					350.566
			TOTAL		1,137.103

VI CONCLUSIONES

Con el propósito de aportar a la reducción de la contaminación ambiental por desperdicios plásticos y disminuir los costos de por tonelada de las mezclas asfálticas en caliente se ha identificado, entre los tres porcentajes propuestos: 3%, 5% y 10%, que 3% de HDPE es el sustituto porcentual de los agregados pétreos que obtuvo el mejor desempeño en función de la estabilidad y porcentaje de vacíos.

Se han utilizado los ensayos de ductilidad y penetración para medir la calidad del cemento asfáltico, de donde ha resultado que no cumple con la penetración mínima de 6 mm, requerida para un cemento asfáltico AC-20 y por consecuente con los requisitos de calidad establecidos por el Manual de Carreteras de Honduras para cementos asfálticos utilizados en pavimentos.

Se ha determinado una disminución de 0.16% en el costo por tonelada de mezclas asfálticas utilizando 3% de HDPE como sustituto porcentual de agregados pétreos, considerando los precios actuales de los materiales utilizados en la elaboración de mezclas asfálticas.

Finalmente se ha evaluado el desempeño de las mezclas asfálticas modificadas con 3% de HDPE en comparación con las mezclas no modificadas, mostrando una disminución en la estabilidad (lb) y gravedad específica (g/cm^3) y una disminución en el porcentaje de vacíos (%), considerando una variación de 9% del contenido óptimo de asfalto de las mezclas no modificadas con respecto a las mezclas modificadas con 3% de HDPE como sustituto porcentual de agregados pétreos para poder realizar la comparación del desempeño.

1. Dadas las restricciones de distanciamiento social que exige la pandemia por COVID-19, lo que a la vez limita el uso del laboratorio de Ingeniería Civil de UNITEC ha sido necesario utilizar los resultados de ductilidad obtenidos por los estudiantes de laboratorio de Vías de Comunicación, en conjunto con los resultados de penetración obtenidos durante el ensayo de laboratorio realizado para la investigación con el propósito de definir la calidad del cemento asfáltico como punto de partida de la investigación, encontrando que el cemento asfáltico que inicialmente estaba clasificado como AC-20 califica como AC-40, pero es necesario realizar ensayos complementarios que no aportan al propósito de la investigación. No obstante, de acuerdo con el Manual de Carreteras de Honduras la ductilidad cumple con

el valor mínimo valor esperado (100 cm), por lo que podría haber afectado la temperatura promedio del ensayo de penetración, ya que ambos ensayos son complementarios para determinar la calidad del cemento asfáltico, por lo que, debido a que no se contaba con más provisión de cemento asfáltico se utilizó asumiendo que es AC-20, tal como lo dicen las especificaciones de fabricación, de donde se deduce que la calidad del cemento asfáltico no afectó los resultados obtenidos en el ensayo Marshall.

2. Se ha identificado el porcentaje de HDPE como sustituto porcentual de los agregados pétreos que menos afecta el desempeño de las mezclas asfálticas modificadas haciendo uso del ensayo de resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas usando el aparato Marshall, realizado de acuerdo a lo indicado por la norma ASTM D1559-76, resultando en 3% de sustitución porcentual equivalente de los agregados por HDPE por mostrar ser superior a los resultados de desempeño obtenidos para 5% y 10% de sustitución, utilizando la estabilidad (lb), gravedad específica (g/cm^3) y porcentaje de vacíos (%) como criterios de evaluación del desempeño.
3. Se ha determinado la estabilidad y el porcentaje de vacíos de las mezclas asfálticas modificadas con distintos porcentajes de sustitución de agregados pétreos por HDPE y las no modificadas, realizando tres pastillas por cada porcentaje de HDPE (3%, 5% y 10%) y las no modificadas, resultando en una estabilidad promedio de 1,182.92 lb y 4.87% de vacíos para las no modificadas, 431.03 lb y 3.31% de vacíos para las modificadas con 3% de HDPE. Los resultados indican una disminución considerable de la estabilidad de las mezclas modificadas con respecto a las no modificadas como efecto negativo y una disminución del porcentaje de vacíos como efecto positivo en el desempeño, por lo que no se puede confirmar una disminución del desempeño utilizando la estabilidad y porcentaje de vacíos como criterios de evaluación del desempeño.
4. El análisis comparativo del efecto que tiene el uso de 3% de HDPE como sustituto porcentual de los agregados pétreos, en el desempeño de las mezclas asfálticas modificadas con HDPE y las mezclas no modificadas, se ha realizado utilizando la estabilidad, gravedad específica y porcentaje de vacíos como criterios de comparación, resultando en una disminución de

64% en la estabilidad, una disminución de 4.4% en la gravedad específica y una disminución en el porcentaje de vacíos de 47% en las mezclas asfálticas modificadas con HDPE (3%) con respecto a las no modificadas. Asimismo, se ha determinado que el uso de 3% de sustitución porcentual de agregados por HDPE representa el reciclaje de 28 kg por tonelada de mezcla asfáltica, demostrándose que en grandes volúmenes de mezcla asfáltica se podría reducir el impacto ambiental por desperdicios plásticos.

5. Se ha determinado que el costo de la mezcla asfáltica modificada con HDPE es de 1,137.10 Lps/ton, donde se incluye el costo de 80 Lps/ton de HDPE según datos del Diagnóstico de la Cadena Productiva de Desechos Sólidos en Honduras (Minelli, 2012), valor que se ha comparado con el costo de las no modificadas de 1,138.85 Lps/ton encontrando una disminución de 1.75 Lps/ton lo que demuestra que en grandes volúmenes de mezcla asfáltica la diferencia de costos por tonelada de mezclas asfálticas modificadas y no modificadas es significativa, dado que utilizando 3% de sustitución porcentual de agregados pétreos por HDPE por ser el porcentaje analizado con mejores resultados de desempeño, resulta en una disminución de 0.16% en comparación con las mezclas asfálticas no modificadas.
6. Del análisis comparativo del costo de elaboración de mezclas asfálticas modificadas con 3% de HDPE y las no modificadas se ha determinado una reducción en el costo por tonelada de Lps. 1.75 y a su vez, se ha determinado una reducción de la estabilidad Marshall de 751.89 lb, por lo que ha sido necesario considerar ambos parámetros, en una relación estabilidad/costo, de comparación para poder determinar si verdaderamente ha habido una reducción de costos en la elaboración de las mezclas asfálticas. En consideración de lo anterior, se ha determinado que la relación estabilidad/costo de las mezclas asfálticas modificadas con 3% de HDPE es de 0.38 y de 1.04 para las no modificadas, lo que sugiere un aumento de costos en la elaboración de las mezclas modificadas, considerando la disminución de la estabilidad (lb).

VII RECOMENDACIONES

1. Realizar los ensayos de ductilidad, penetración y viscosidad de acuerdo a lo indicado por las normas ASTM, para la clasificación del cemento asfáltico y la determinación de la calidad previo al inicio de futuras investigaciones, de manera que se garantice el uso de cemento asfáltico que cumpla con los parámetros de calidad establecidos por el Manual de Carreteras de Honduras.
2. Considerar el uso de porcentajes de HDPE como sustituto porcentual de los agregados pétreos diferentes a los utilizados en el presente informe, como ser rangos más pequeños entre los porcentajes utilizados o superiores al 10%, tomando en cuenta los hallazgos de otras investigaciones que se encuentren en la literatura de revisión para futuras investigaciones. Asimismo, considerar el uso de diferentes tipos de plásticos y sus combinaciones, como ser LDPE o PET, de acuerdo a los tamaños de partícula disponibles en el mercado nacional para la evaluación del desempeño y el análisis de variación de costos en la elaboración de mezclas asfálticas.
3. Utilizar el método de incorporación por vía húmeda de desperdicios plásticos en las mezclas asfálticas en caliente, que consiste en incorporar el plástico al cemento asfáltico previo a ser mezclado con los agregados pétreos, con el fin de determinar el efecto que tiene en la calidad del cemento asfáltico utilizado, en el desempeño de las mezclas asfálticas modificadas en comparación con las no modificadas y para determinar la variación en el costo por tonelada de mezcla asfáltica. Asimismo, se recomienda realizar más ensayos en el cemento asfáltico a utilizar considerando el método de incorporación que se emplee, como ser penetración y ductilidad en cementos asfálticos modificados, viscosidad a 60 °C, punto de encendido, punto de reblandecimiento, ensayo de película delgada en horno y ensayo de abrasión de Los Ángeles para incorporación por vía seca en caso de que exista recubrimiento superficial del agregado grueso por derretimiento del plástico utilizado.
4. Determinar la granulometría del HDPE o plástico que se desee utilizar, para conocer la distribución de las partículas por tamaño y así poder realizar una sustitución porcentual de los agregados de manera que se reduzca el impacto de la sustitución en los porcentajes ideales de

agregado grueso y fino utilizados en la determinación del peso por material en las mezclas asfálticas.

BIBLIOGRAFÍA

1. ASTM International. (Enero de 1976). *D-1559 Resistance to plastic flow of bituminous mixtures using marshall apparatus.*
2. ASTM International. (Junio de 2006). *Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials D 5 – 06.*
3. ASTM International. (Enero de 2008). *D 113 – 07 Standard Test Method for Ductility of Bituminous Materials.*
4. D. g. (Diciembre de 1996). Manual de carreteras tomo 4. *Diseño de pavimentos y mantenimiento de caminos.*
5. D. g. (Diciembre de 1996). Manual de carreteras tomo 5. *Especificaciones generales para la construcción .*
6. S. d. (Noviembre de 2002). Manual centroamericano para diseño de pavimentos.
7. Dr. Ir. Hendro SUBROTO, M. P. (2014). *Asphalt Technology Integrated into Road Engineering for the Tropics.*
8. Fann Yin, P. (Octubre de 2020). Recycled plastics in asphalt . *Recycled plastics in asphalt part B: Literature review.* Estados Unidos.
9. Geyer, R. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *SCIENCE ADVANCES*, 3(7),1-5, <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>.
10. Guzmán, J. F. (2011). Manual de plásticos para diseñadores.
11. Hernández, R., & Fernández, C. (2006). *Metodología de la investigación.* McGraw-Hill.

12. Mamlouk, M. S. (2009). *Materiales para ingeniería civil* . Pearson Educación S.A.
13. Minelli, M. (2012 de Agosto de 2012). Diagnostico de la Cadena Productiva de Desechos Sólidos en Honduras. *Diagnostico de la Cadena Productiva de Desechos Sólidos en Honduras*. Union Europea.
14. Montalvo, L. (2007). *Plásticos industriales y su procesamiento* . El Cid Editor.
15. Patricia Nana Ama Asare, F. A. (2018). Evaluation of incorporating plastic wastes into. *Cogent Environmental Science* , 1-13.
16. Richard Willis, P. (Octubre de 2020). Recycled plastics in asphalt. *Recycled plastics in asphalt part A: State of knowledge*.
17. Rojo-Nieto, E. (2017). *Basuras marinas, plásticos y microplásticos: orígenes, impactos y consecuencias de una amenaza global* . Ecologistas en Acción.
18. Rondón Quintana, H. A. (2016). Pavimentos: materiales, construcción y diseño. Ecoe Ediciones
19. S.F. Wong, A. H. (2017). Utilization of Waste Plastics in Stone Mastic Asphalt. *Trans Tech Publications*, 55-59.
20. Speight, J. G. (2016). *Asphalt materials science and technology*. Oxford: Elsevier Inc.
21. Xavier Elias, L. J. (2012). Los plásticos residuales y sus posibilidades de valoración . En L. Jurado, *Reciclaje de residuos industriales* (pág. 39). Ediciones Díaz de Santos.

ANEXOS

Anexo 1 -Asesoría semana 1

Tabla 34 Asesoría técnica semana 1


ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

MBRE DEL PROYECTO:

Evaluación del Desempeño de Mezclas Asfálticas Modificadas con Plástico
Alta Densidad (HDPE) Reciclado

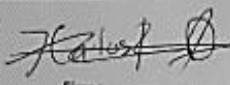
EGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Daniel Averzuz	11741457

ASESORAMIENTO	N°: 1
ASESOR: Ing. Luz Marina Funes	
1.	Se determinó utilizar para la investigación el 3, 5 y 10 porciento de HDPE agregado como porcentaje de agregados a las mezclas, manteniendo siempre un tamaño de partícula de plástico.
2.	Se necesitan 30 kg de mezcla asfáltica en total, por lo que se recomienda contactar con Santos y compañía, para la donación de asfalto o incluso mezcla asfáltica.
3.	Enviar lo antes posible los avances del documento de investigación, para acelerar la admisión del ensayo de ablandamiento con UnoPetrol.
4.	Verificar la disponibilidad de asfalto en el laboratorio de ingeniería civil y de plástico con el proveedor.
5.	
6.	
7.	
8.	
9.	
10.	
 FIRMA DEL ASESOR	SEIIO
	Fecha: 22/01/2021

Anexo 2- Asesoría semana 2

Tabla 35 Asesoría técnica semana 2

ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO	
NOMBRE DEL PROYECTO: Evaluación del Desempeño de Mezclas Astálticas Modificadas con Polietileno de Alta Densidad (HDPE) Reciclado	
INTEGRANTES:	
NOMBRE	CUENTA
Daniel Averruz	11741457
ASESORAMIENTO	Nº: 1
ASESOR: Ing. Juan Carlos Reyes	
1. - Se discutió la disponibilidad	
2 de asfalto y materiales	
3 para la elaboración de los	
4 ensayos.	
5 - Se dispone de asfalto	
6 en laboratorio, pero reciente-	
7 mente no presenta los valores	
8 mínimos de calidad.	
9 - Se definió fecha y horas	
10 de ingreso a laboratorio.	
 Firma	SEHO Fecha: 28/01/2021

Anexo 3 -Asesoría semana 3

Tabla 36 Asesoría técnica semana 3


ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Evaluación del Desempeño de Mezclas Asfálticas Modificadas con Plástico de Alta Densidad (HDPE) Reciclado

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Daniel Averzuz	11741457

ASESORAMIENTO	N°: <u>3</u>
ASESOR: Ing. Luz Marina Funes	
1.	Se discutió la evaluación de la calidad del cemento asfáltico modificado y se determinó que no se encuentra dentro del alcance del proyecto, pero podría ser analizado en estudios posteriores.
2.	La compra o donación de asfalto se ha dificultado en Tegucigalpa, por lo que se decidió utilizar el asfalto disponible en laboratorio.
3.	Se presentaron los avances de marco teórico y se revisaron los contenidos de cada capítulo, sugiriendo la inclusión de los métodos de mezclado de mezclas asfálticas modificadas con plástico.
4.	
5.	
6.	
7.	
8.	
9.	
10.	
 FIRMA DEL ASESOR	SEIIO
	Fecha: <u>05/02/2021</u>

Anexo 4- Asesoría semana 4

Tabla 37 Asesoría técnica semana 4


ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Evaluación del Desempeño de Mezclas Asfálticas Modificadas con Polietileno de Alta Densidad (HDPE) Reciclado

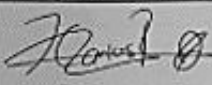
INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Daniel Averruz	11741457

ASESORAMIENTO	Nº: <u>5</u>
ASESOR: Ing. Luz Marina Funes	
1. Dada la situación de entrada a la universidad, se planteó consultar con ASP y CINSA para poder realizar los ensayos en sus instalaciones.	
2 Se decidió utilizar el ensayo de ductilidad para la investigación, dado que no se podrá realizar el ensayo de reblandecimiento.	
3 Se revisaron los avances del informe y presentación de medio periodo, sugiriendo hacer más énfasis en la metodología.	
4 _____	
5 _____	
6 _____	
7 _____	
8 _____	
9 _____	
10 _____	
 FIRMA DEL ASESOR	SEIIO
	Fecha: <u>19/02/2021</u>

Anexo 5-Asesoría semana 5

Tabla 38 Asesoría técnica semana 5

ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO	
NOMBRE DEL PROYECTO: Evaluación del Desempeño de Mezclas Asfálticas Modificadas con Polietileno de Alta Densidad (HDPE) Reciclado	
INTEGRANTES:	
NOMBRE	CUENTA
Daniel Averruz	11741457
ASESORAMIENTO	
Nº 2	
ASESOR: Ing. Juan Carlos Reyes	
1. - Se discutió la posibilidad 2 de elaborar 2 probetas por 3 c/a porcentaje de asfalto 4 para el diseño de mezclas, 5 por lo que se preparó material. 6 - Se debe especificar la 7 temperatura de derretido del 8 HDPE para realizar los ensayos 9 Marshall a cabalidad. 10 - Presentar cálculos de diseño para el día viernes.	
 Firma	SEIIO Fecha: 25/02/2021

Anexo 6-Asesoría semana 6

Tabla 39 Asesoría técnica semana 6

ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Evaluación del Desempeño de Mezclas Asfálticas Modificadas con Polietileno de Alta Densidad (HDPE) Reciclado

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Daniel Averruz	11741457

ASESORAMIENTO		Nº: 6
ASESOR: Ing. Luz Marina Funes		
1.	Se discutieron los resultados del ensayo de penetración, ya que no cumplen con los valores mínimos por lo que se decidió colocar el comentario dentro del informe y proseguir con los ensayos de igual manera.	
2.	Para el ensayo Marshall en el diseño de mezcla, se encontró un valor incoherente dentro de los distintos porcentajes (8%), se recomienda eliminar el 8% para efectos de diseño y considerar repetir el ensayo el día lunes.	
3.	En caso de encontrar un valor coherente para el 8%, se incorporará en los resultados de diseño de mezcla de Marshall.	
4.	Se recomienda realizar una probeta más por cada porcentaje para aumentar la confiabilidad del ensayo.	
5.	Queda pendiente solicitar información de costos a ASP en relación a las mezclas asfálticas en caliente.	
6.	Investigar reglamentación de mezclas asfálticas modificadas y normativas para incluir en marco teórico.	
7.		
8.		
9.		
10.		
Firma	SEIIO	Fecha: <u>26/02/2021</u>

Anexo 7-Asesoría semana 7

Tabla 40 Asesoría técnica semana 7

ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Evaluación del Desempeño de Mezclas Asfálticas Modificadas con Polietileno de Alta Densidad (HDPE) Reciclado

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Daniel Averguz	11741457

ASESORAMIENTO		Nº: 7
ASESOR: Ing. Luz Marina Funes		
1.	Se discutieron los resultados de laboratorio de mezclas modificadas y no modificadas, por lo que se propuso concluir en base a los criterios de <u>estabilidad, peso específico y porcentaje de vacíos.</u>	
2.	Considerar el costo de la arena de manera indirecta en las fichas que se proporcionaron.	
3.	Se concluye que el asfalto no tiene el grado de penetración requerido para un AC-20, por lo que se debe determinar en que afecta o condiciona la <u>investigación.</u>	
4.	_____	
5.	_____	
6.	_____	
7.	_____	
8.	_____	
9.	_____	
10.	_____	
Firma	SEIIO	Fecha: <u>12/03/2021</u>

Anexo 8-Asesoría semana 8

Tabla 41 Asesoría técnica semana 8


ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Evaluación del Desempeño de Mezclas Asfálticas Modificadas con Polietileno de Alta Densidad (HDPE) Reciclado

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Daniel Averruz	11741457

ASESORAMIENTO		Nº: 3
ASESOR: Ing. Juan Carlos Reyes		
1.	Se discutieron los resultados de laboratorio de mezclas modificadas y no modificadas, por lo que se propuso concluir en base a los criterios de <u>estabilidad, peso específico y porcentaje de vacíos.</u>	
2.	Considerar que el porcentaje óptimo de mezclas modificadas no cumplirá con los límites establecidos en la norma, por lo que se toma el mejor valor de <u>vacíos para el óptimo pero no cumple con la norma.</u>	
3.	Se concluye que el asfalto no tiene el grado de penetración requerido para un AC-20, por lo que se debe determinar en que afecta o condiciona la <u>investigación, asumiendo que se trata de un AC-20.</u>	
4.	Se proporcionó el informe de ductilidad, peso específico y granulometría de los alumnos de Laboratorio.	
5.		
6.		
7.		
8.		
9.		
10.		
 Firma		Fecha: <u>16/03/2021</u>
SEIIO		

Anexo 9- Costos de mezclas modificadas con 5% de HDPE

Tabla 42 Ficha de costos unitarios de mezclas asfálticas modificadas con 5% de HDPE

Actividad: Carpeta Asfáltica (Producción, Colocación y Compactación)					
Unidad: TON				Precio	Costo
Descripción	Unidad	Cantidad	Producto (L.)		Total (L.)
1.	MATERIALES				
ASFALTO DILUIDO RC-250	GL	0.48648	49.934		24.292
LIGANTE ASFALTICO AC-20	GL	13.35460	46.043		614.883
POLIETILENO DE ASLTA DENSIDAD (HDPE)	TON	0.04750	80.000		3.800
GRAVA DE RIO	M3	0.40779	309.936		126.388
					769.363
2.	MANO DE OBRA				
AYUDANTE	HRH	0.03800	16.403		0.623
CHEQUEADOR	HRH	0.00950	15.746		0.150
CAPATAZ	HRH	0.01900	41.990		0.798
ENCARGADO DE ASFALTOS	HRH	0.00950	164.025		1.558
ELECTRICISTA	HRH	0.01900	32.805		0.623
JEFE DE PLANTA TRITURADORA	HRH	0.01420	147.662		2.097
JEFE DE PLANTA ASFALTICA	HRH	0.00950	209.952		1.995
MECANICO	HRH	0.01900	20.995		0.399
MOTORISTA	HRH	0.17100	20.995		3.590
OPERADOR DE EQUIPO PESADO	HRH	0.04750	25.312		1.202
OPERADOR DE PLANTA	HRH	0.01900	53.302		1.013
PEON	HRH	0.12350	16.403		2.026
					16.073
3.	HERRAMIENTA Y EQUIPO				
COMPRESOR I.R. 175CPM	HRM	0.00950	623.295		5.921
BASCULA	HRM	0.01900	918.540		17.452
CAMION DE PERSONAL	HRM	0.01900	406.782		7.729
PICK-UP	HRM	0.02850	393.660		11.219
CARGADOR FRONTAL DE 3 a 4 YD3	HRM	0.05680	1,115.370		63.353
ESPARCIDORA DE CONCRETO Y AGREGADOS	HRM	0.00950	557.685		5.298
COMPACTADORA VIBR.RODILLO LISO AUTOPROP.	HRM	0.02850	721.710		20.569
COMPACTADORA NEUMATICA	HRM	0.02850	721.710		20.569
TANQUE DISTRIBUIDOR DE ASFALTOS	HRM	0.00950	1,115.370		10.596
BARREDORA CATERPILLAR MOD. 246	HRM	0.00950	341.172		3.241
GRUPO ELECTROGENO	HRM	0.02840	656.100		18.633
PLANTA DE ASFALTO	HRM	0.00950	1,115.370		10.596
PLANTA TRITURADORA DE AGREGADO 90M3/HR	HRM	0.01420	2,361.960		33.540
FINISHER B.G. 270B, 187 HP,337.7 CWT	HRM	0.00950	3,936.600		37.398
TRANSFORMADOR	HRM	0.04260	642.978		27.391
VOLQUETA DE 10 M3	HRM	0.08550	656.100		56.097
HERRAMIENTAS - %			6.00%		0.964
					350.566
			TOTAL		1,136.002

Anexo 10-Costos de mezclas modificadas con 10% de HDPE

Tabla 43 Ficha de costos unitarios de mezclas asfálticas modificadas con 10% de HDPE

Actividad: Carpeta Asfáltica (Producción, Colocación y Compactación)				
Unidad:	TON		Precio	Costo
Descripción	Unidad	Cantidad	Producto (L.)	Total (L.)
1	MATERIALES			
ASFALTO DILUIDO RC-250	GL	0.48648	49.934	24.292
LIGANTE ASFALTICO AC-20	GL	13.35460	46.043	614.883
POLIETILENO DE ASLTA DENSIDAD (HDPE)	TON	0.09499	80.000	7.600
GRAVA DE RIO	M3	0.38633	309.936	119.736
				766.510
2	MANO DE OBRA			
AYUDANTE	HRH	0.03800	16.403	0.623
CHEQUEADOR	HRH	0.00950	15.746	0.150
CAPATAZ	HRH	0.01900	41.990	0.798
ENCARGADO DE ASFALTOS	HRH	0.00950	164.025	1.558
ELECTRICISTA	HRH	0.01900	32.805	0.623
JEFE DE PLANTA TRITURADORA	HRH	0.01420	147.662	2.097
JEFE DE PLANTA ASFALTICA	HRH	0.00950	209.952	1.995
MECANICO	HRH	0.01900	20.995	0.399
MOTORISTA	HRH	0.17100	20.995	3.590
OPERADOR DE EQUIPO PESADO	HRH	0.04750	25.312	1.202
OPERADOR DE PLANTA	HRH	0.01900	53.302	1.013
PEON	HRH	0.12350	16.403	2.026
				16.073
3	HERRAMIENTA Y EQUIPO			
COMPRESOR LR. 175CPM	HRM	0.00950	623.295	5.921
BASCULA	HRM	0.01900	918.540	17.452
CAMION DE PERSONAL	HRM	0.01900	406.782	7.729
PICK-UP	HRM	0.02850	393.660	11.219
CARGADOR FRONTAL DE 3 a 4 YD3	HRM	0.05680	1,115.370	63.353
ESPARCIDORA DE CONCRETO Y AGREGADOS	HRM	0.00950	557.685	5.298
COMPACTADORA VIBR. RODILLO LISO AUTOPROP.	HRM	0.02850	721.710	20.569
COMPACTADORA NEUMATICA	HRM	0.02850	721.710	20.569
TANQUE DISTRIBUIDOR DE ASFALTOS	HRM	0.00950	1,115.370	10.596
BARREDORA CATERPILLAR MOD. 246	HRM	0.00950	341.172	3.241
GRUPO ELECTROGENO	HRM	0.02840	656.100	18.633
PLANTA DE ASFALTO	HRM	0.00950	1,115.370	10.596
PLANTA TRITURADORA DE AGREGADO 90M3/HR	HRM	0.01420	2,361.960	33.540
FINISHER B.G. 270B, 187 HP,337.7 CWT	HRM	0.00950	3,936.600	37.398
TRANSFORMADOR	HRM	0.04260	642.978	27.391
VOLQUETA DE 10 M3	HRM	0.08550	656.100	56.097
HERRAMIENTAS - %			6.00%	0.964
				350.566
			TOTAL	1,133.149

Anexo 11-Materiales 5% de HDPE

Tabla 44-Masa de los materiales para 5% de HDPE

Masa probeta		1200	gramos
Material	% por peso del agregado	% Por peso de la mezcla	Pesos por material (gr.)
Asfalto	5.27	5.01	60.07
Grava	48.88	46.43	557.20
Arena	45.12	42.86	514.33
Filler	3	2.85	34.20
Polietileno	3	2.85	34.20
Total	105.27	100.000	1200.00

Anexo 12-Materiales 10% de HDPE

Tabla 45-Masa de los materiales para 10% de HDPE

Masa probeta		1200	gramos
Material	% por peso del agregado	% Por peso de la mezcla	Pesos por material (gr.)
Asfalto	5.27	4.93	59.10
Grava	45.24	42.28	507.36
Arena	41.76	39.03	468.34
Filler	3	2.80	33.64
Polietileno	10	9.35	112.15
Total	105.27	98.383	1180.60

Anexo 13-Polímeros para mezclas asfaltos

Tabla 46 Polímeros utilizados para modificar asfaltos (Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos)

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

Fuente: (centroamericana, 2002)

Anexo 14-Precios de materiales reciclados en Honduras

Tabla 47 Precios promedio de los materiales reciclables pagados en cada nivel de la cadena de valores

Descripción	Acopio Pequeño		Acopio Mediano		Exportador	Industria				Precio de Exportación	
	L\$/qq	US\$/qq	L\$/qq	US\$/qq		L\$/qq	US\$/qq	L\$/qq	US\$/qq	L\$/qq	US\$/qq
Papel mixto	50-70	2.57-3.60	90-100	4.63-5.14							
Papel Blanco			100/150	5.14-7.71	240-260	12.34-13.37				330	16.96
Papel Color					110	5.65				195	10.02
Papel periódico			20-30	1.03-1.54	50	2.57	100-150	5.14-7.71		90	4.63
Cartón	30-40	1.54-2.05	60	3.08	80	4.11				128	6.58
Plástico bolsa	100-150	5.14-7.71	230-300	11.82-15.42	550-700	28.27-35.99	550-700	28.27-35.99		800-900	41.13-46.27
Plástico DURO	100-120	5.14-6.17	200-250	10.28-12.85	250-400	12.85-20.56	550-700	28.27-35.99		800-900	41.13-46.27
plásticos (PET)	300-350	15.42-17.99	400-450	20.56-23.13	500	25.70				N.E.	
Hierro	150-200	7.71-10.28	150-200	7.71-10.28	250-300	12.85-15.42	N.E.			350	17.99
Aluminio	800-900	41.13-46.27	800-900	41.13-46.27	1100-1200	56.55-61.69				1800	92.54
Cobre	4500	231.36	4500	231.36	5400-5600	277.63-287.91				8800	452.44
Vidrio					15-25	0.77-1.28				88	4.52

Fuente: (Minelli, 2012)

Anexo 15-Criterios para mezcla del método Marshall

Tabla 48 Criterios de resultados Marshall para mezclas asfálticas

Criterios para Mezcla del Metodo Marshall	Transito Liviano Carpeta y Base		Transito Mediano Carpeta y Base		Transito Pesado Carpeta y Base	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Compactacion, numero de golpes en cada cara de la probeta	35		50		75	
Estabilidad, N (lb.)	3336 (750)	—	5338 (1200)	—	8006 (1800)	—
Flujo, 0.25 mm (0.01 pulgadas)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de Vacios	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de Vacios en el Agregado Mineral (VMA)	<i>Ver Figura 3.20</i>					
Porcentaje de Vacios llenos de Asfalto (VFA)	70	80	65	78	65	75

NOTAS

¹ Todos los criterios y no solo estabilidad, deben ser considerados al diseñar una mezcla asfáltica de pavimentación. Las mezclas asfálticas en caliente de base que no cumplan estos criterios, cuando se ensayen a 60°C, se consideraran satisfactorias si cumplen los criterios cuando se ensayen a 38°C, y si se colocan a 100 mm o mas por debajo de la superficie. Esta recomendación se aplica solamente a las regiones que tengan una variedad de condiciones climáticas similar a la que prevalece en casi todas las regiones de Estados Unidos. En las regiones que tengan condiciones climáticas mas extremas puede ser necesario usar temperaturas mas bajas de ensayo.

² Clasificaciones del Transito
 Liviano Condiciones de transito que resultan en un EAL de diseño < 104
 Mediano Condiciones de transito que resultan en un EAL de diseño entre 104 y 106
 Pesado Condiciones de transito que resultan en un EAL de diseño > 106

³ Los esfuerzos de compactación en el laboratorio deberán aproximarse a la densidad máxima obtenida en el pavimento bajo el transito.

⁴ Los valores de fluencia se refieren al punto en donde la carga comienza a disminuir.

⁵ Cuando se este calculando el porcentaje de vacíos, deberá permitirse cierta tolerancia en la porción de cemento asfáltico perdida por absorción en las partículas de agregado

⁶ El porcentaje de vacíos en el agregado mineral debe ser calculado con base en el peso específico total ASTM del agregado.

Fuente: (ASTM International, 1976)

Anexo 16-Curva granulométrica ajustada por tamaño máximo

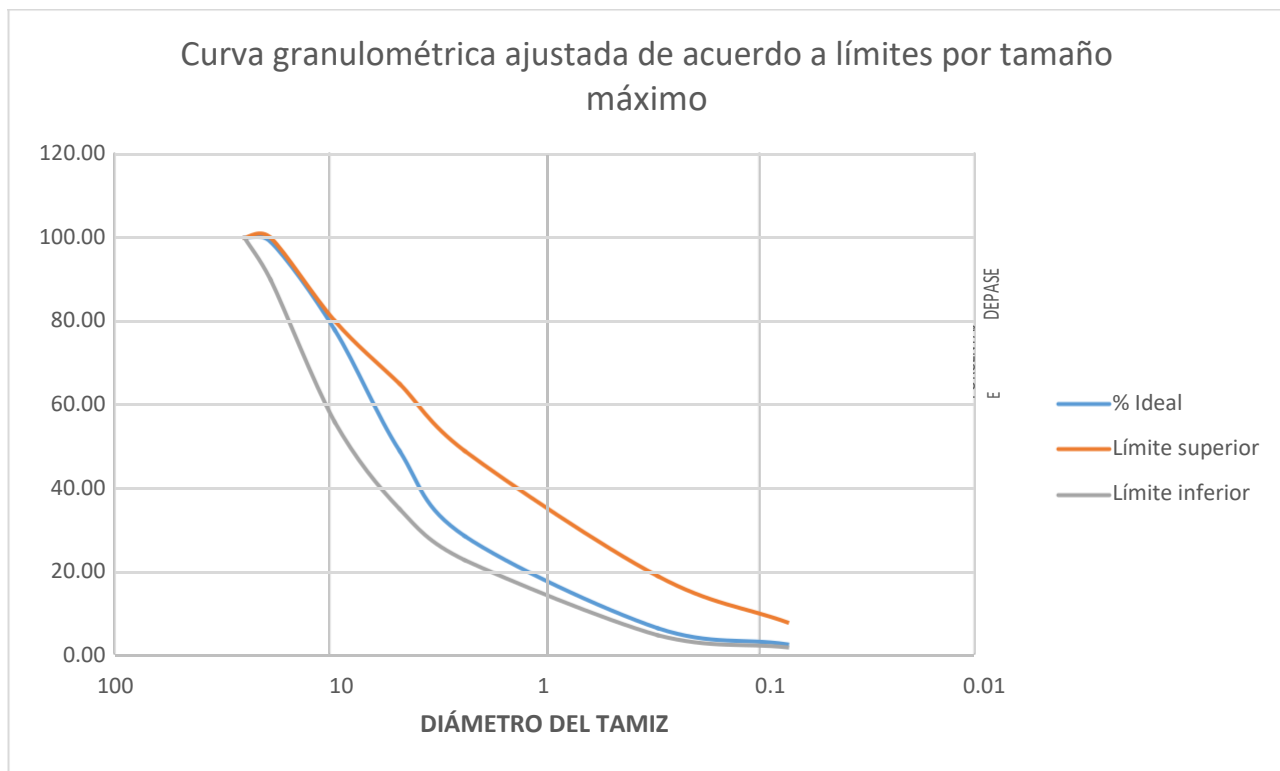


Ilustración 30 Curva granulométrica ajustada a límites de acuerdo a tamaño máximo del agregado grueso

Anexo 17-Gráfica de estabilidad de mezclas modificadas

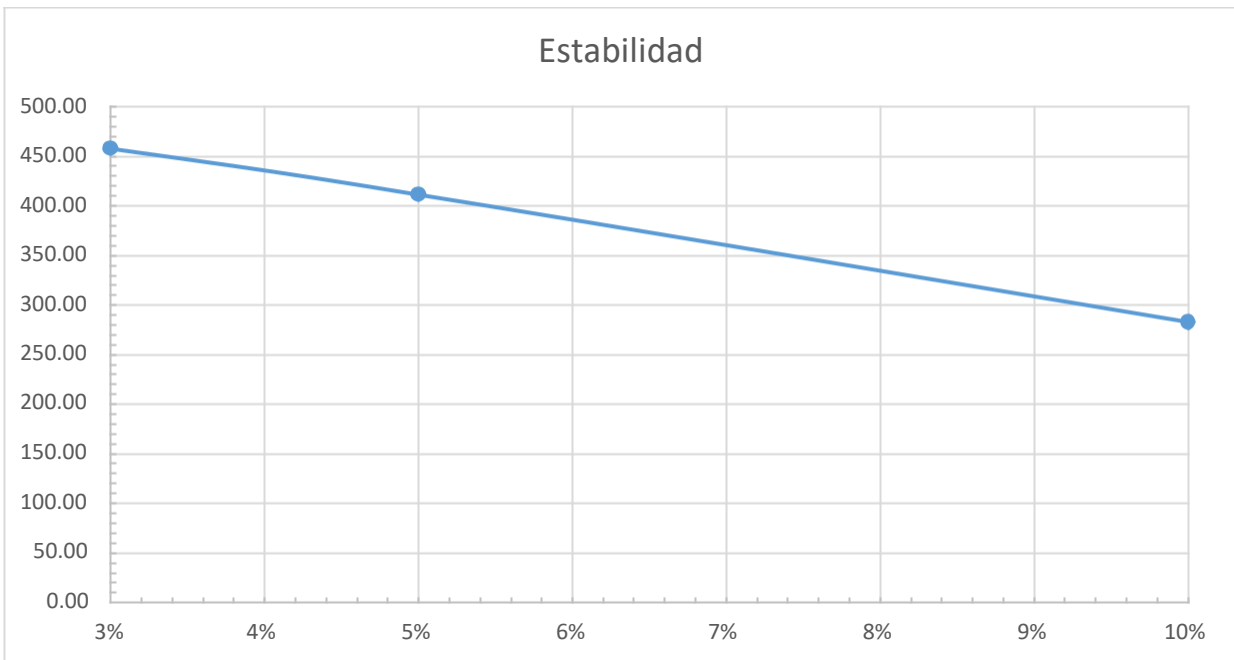


Ilustración 31 Gráfica de estabilidad para mezclas modificadas con 3%, 5% y 10%

Anexo 18-Gráfica de peso específico de mezclas modificadas

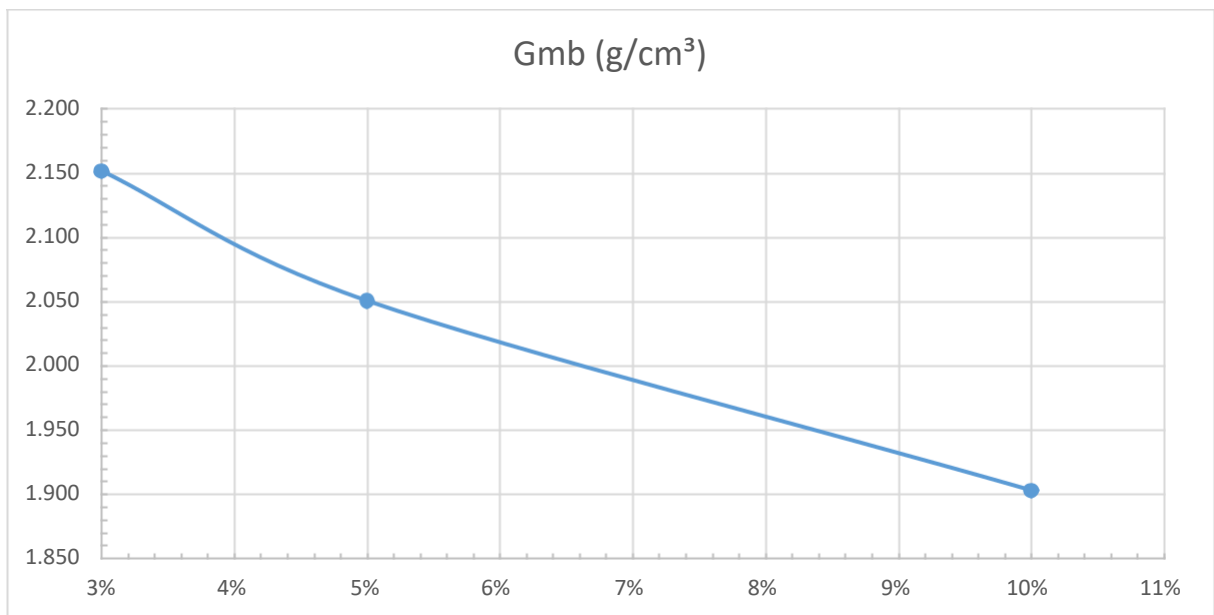


Ilustración 32 Gráfica de peso específico para mezclas modificadas con 3%, 5% y 10%

Anexo 19- Gráfica de porcentaje de vacíos de mezclas modificadas

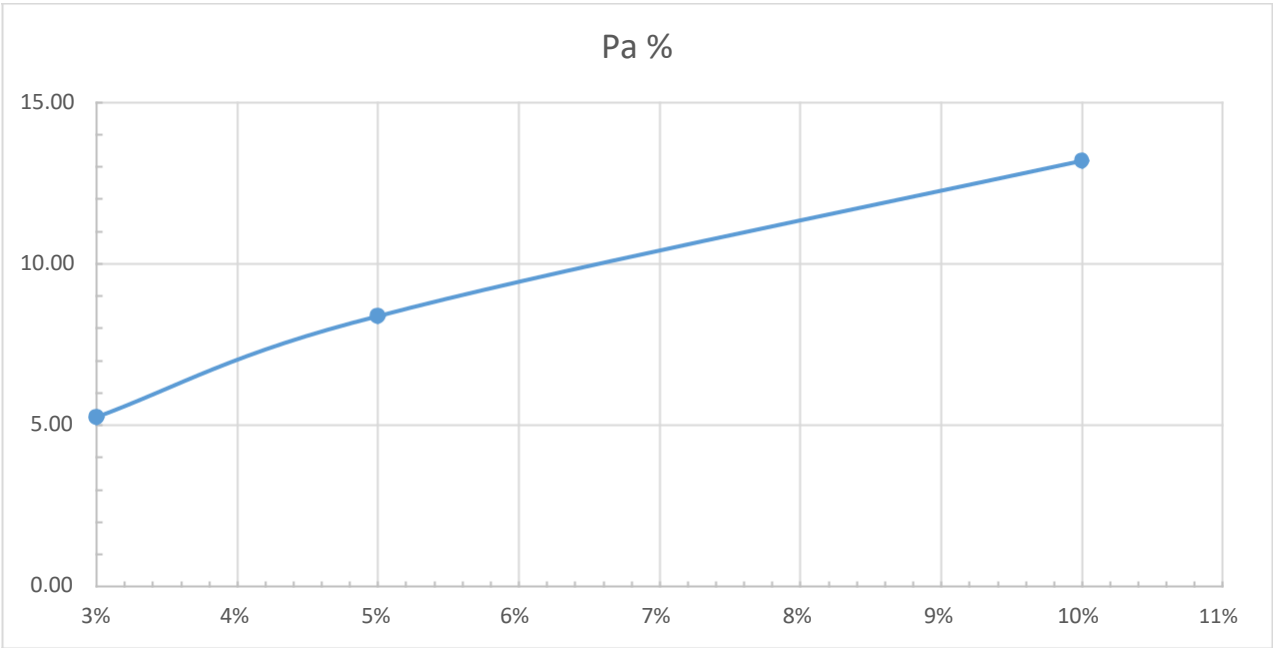


Ilustración 33 Gráfica de porcentaje de vacíos para mezclas modificadas con 3%, 5% y 10%

Anexo 20-Factor de corrección de estabilidad Marshall

Tabla 49 Factor de corrección de estabilidad Marshall

VOLUMEN DE LA MUESTRA EN cm ³	ESPELOR APROXIMADO DE LA MUESTRA EN mm	FACTOR DE CORRECCION
200-213	25.4	5.56
214-225	26.9	5.00
226-237	28.6	4.55
238-250	30.2	4.17
251-264	31.8	3.85
265-276	33.3	3.57
277-289	34.9	3.33
290-301	36.5	3.03
302-316	38.1	2.78
317-328	39.7	2.50
329-340	41.3	2.27
341-353	42.9	2.08
354-367	44.5	1.92
368-379	46.0	1.79
380-392	47.6	1.67
393-405	49.2	1.56
406-420	50.8	1.47
421-431	52.4	1.39
432-443	54.0	1.32
444-456	55.6	1.25
457-470	57.2	1.19
471-482	58.7	1.14
483-495	60.3	1.09
496-508	61.9	1.04
509-522	63.5	1.00
523-535	65.1	0.96
536-546	66.7	0.93
547-559	68.3	0.89
560-573	69.9	0.86
574-585	71.5	0.83
586-598	73.0	0.81
599-610	74.6	0.78
611-625	76.2	0.76

Fuente: (ASTM International, 1976)