



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

**MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE ADICIONANDO TEREFTALATO DE
POLIETILENO COMO AGREGADO POR EL MÉTODO DE MARSHALL**

Brayan Josué Ortíz Marroquín

Asesorado por el Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos

Guatemala, octubre de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE ADICIONANDO TEREFTALATO DE
POLIETILENO COMO AGREGADO POR EL MÉTODO DE MARSHALL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

BRAYAN JOSÚE ORTÍZ MARROQUÍN

ASESORADO POR EL ING. DARÍO FRANCISCO LUCAS MAZARIEGOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. José Gabriel Ordóñez Morales
EXAMINADOR	Ing. Alan Geovani Cosillo Pinto
EXAMINADOR	Ing. Luis Eduardo Portillo España
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO COMO AGREGADO POR EL MÉTODO DE MARSHALL

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 15 de abril de 2016.

Brayan Josué Ortiz Marroquín

Guatemala, 3 de julio del 2017

Ingeniero
José Gabriel Ordoñez Morales
Coordinador del Área de Materiales de Construcción
Universidad de San Carlos de Guatemala
Guatemala

Ingeniero Ordoñez:

Al saludarle cordialmente, me dirijo a usted para informarle que ha sido concluido satisfactoriamente el trabajo de graduación titulado: "MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO COMO AGREGADO POR EL MÉTODO DE MARSHALL" elaborado por el estudiante Brayan Josué Ortiz Marroquín con carné 201114617, tema para el cual fui asignado como asesor.

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

Atentamente,



Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos
Colegiado 10,266

Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos.
Colegiado 10266



USAC
TRICENTENARIA
 Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Guatemala,
 08 de agosto de 2017

Ingeniero
 Hugo Leonel Montenegro Franco
 Director Escuela Ingeniería Civil
 Facultad de Ingeniería
 Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO COMO AGREGADO POR EL MÉTODO DE MARSHALL** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Brayan Josué Ortiz Marroquín quien contó con la asesoría del Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Civil José Gabriel Ordóñez Morales
 Coordinador del Área de Materiales y
 Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES

USAC

/mrrm.

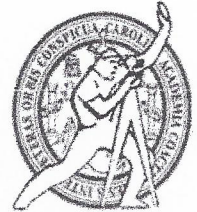





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos y Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación del estudiante Brayan Josué Ortiz Marroquín MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO COMO AGREGADO POR MÉTODO DE MARSHALL da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, octubre 2017

/mmm.

Mas de 136 años de Trabajo y Mejora Continua





DTG. 473.2017

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO COMO AGREGADO POR EL MÉTODO DE MARSHALL**, presentado por el estudiante universitario: **Brayan Josué Ortíz Marroquín**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, octubre de 2017

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

Dios Todopoderoso	Por tener amor incondicional y darme muchas bendiciones, las cuales han hecho milagros en momentos muy especiales; quien además nunca falla y quien me ha dado la oportunidad de lograr toda meta que me he propuesto en la vida.
Mis padres	Robinson Ortiz Cabrera y Zoila Marroquín de Ortiz, por su amor, oración, apoyo incondicional, comprensión y por guiarme en el camino de rectitud para lograr esta meta, sabiendo que estamos en las manos de Dios.
Mis hermanos	Andrew y Valerie Ortiz, por su amor, apoyo y motivación, el cual me ha sido de bendición.
Mis abuelos	Benedicto Ortiz y Dila Luz Cabrera de Ortiz, por su oración y apoyo que son de bendición.
Mi familia	Por el apoyo que han dado en todo momento.
Universidad de San Carlos de Guatemala	La Tricentenario casa de estudios y principalmente a la Facultad de Ingeniería, por formarme como exitoso profesional.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios Todopoderoso

Por la bendición de permitirme alcanzar una meta muy especial, teniendo fe y fortaleza en el, para seguir adelante y dar todo lo mejor de mí.

Mis padres

Robinson Ortiz Cabrera y Zoila Marroquín de Ortiz, por ser mi modelo a seguir, haciendo todo con rectitud y todo el apoyo que me otorgaron, ya que no hubiese sido posible este gran logro sin ellos.

Mis hermanos

Andrew y Valerie Ortiz, por cada momento que hemos compartido y el apoyo que siempre ha existido de parte de ustedes. Bendiciones.

Mis abuelos

Benedicto Ortiz y Dila Luz Cabrera de Ortiz por todo el apoyo que me dieron incondicionalmente.

Mis tíos

Erick Geovanni y Janni Ortiz, que siempre me han dado un apoyo grande y significativo en muchas ocasiones.

Mi familia

Por el apoyo que me han brindado en mi diario vivir.

Iglesia	Por sus oraciones y apoyo que me ha dado a mí y a mi familia, en todo momento.
Universidad de San Carlos de Guatemala	La Tricentaria casa de estudios, un lugar muy especial y principalmente a la Facultad de Ingeniería, por formarme como exitoso profesional.
Mi asesor	Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos, por su apoyo incondicional y por haberme guiado en cada paso de la investigación.
José Juan Istupe	Por su amistad y dedicación en todo momento, por compartir todos sus conocimientos y por su ayuda incondicional en cada paso de la investigación y en los diferentes ensayos de laboratorio.
Edgar Francisco Morales	Por su apoyo y amistad en todo momento, por compartir muchas experiencias, y también por su ayuda y motivación en la carrera.
Mis amigos	Por su amistad y por convivir muchas experiencias en la carrera universitaria.
Congreso de Estudiantes de Ingeniería Civil CEIC 2016	Por su amistad y por las vivencias compartidas en este evento.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XIII
GLOSARIO.....	XV
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS	XXI
INTRODUCCIÓN.....	XXIII
1. ANTECEDENTES.....	1
1.1. Estudios previos del polímero tereftalato de polietileno en mezclas asfálticas en caliente	1
1.1.1. Ingeniería del reciclado en envases de tereftalato de polietileno (PET).....	1
1.1.1.1. Resultados obtenidos.....	2
1.1.1.2. Conclusiones.....	3
1.1.1.3. Recomendaciones	3
1.1.2. Criterios del diseño de mezclas asfálticas en caliente	4
1.1.2.1. Resultados obtenidos.....	4
1.1.2.2. Conclusiones.....	6
1.1.2.3. Recomendaciones	6
1.1.3. Asfaltos modificados con polímeros	7
1.1.3.1. Resultados obtenidos.....	7
1.1.3.2. Conclusiones.....	8
1.1.3.3. Recomendaciones	8

2.	POLÍMEROS	9
2.1.	Definición	9
2.2.	Clasificación de los polímeros	11
2.2.1.	Por la estructura química	11
2.2.2.	Por el comportamiento mecánico	11
2.2.2.1.	Plásticos	11
2.2.2.2.	Elastómeros.....	12
2.2.2.3.	Fibras	12
2.2.3.	Por el desempeño mecánico	12
2.3.	Polímeros compatibles con mezclas asfálticas.....	13
3.	TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET).....	15
3.1.	Definición	15
3.2.	Degradación y reciclaje del tereftalato de polietileno (PET)	15
3.3.	Propiedades de polímero tereftalato de polietileno (PET).....	17
3.4.	Preparación de tereftalato de polietileno (PET) para mezclas asfálticas	18
4.	ESTADÍSTICA APROXIMADA DE DESECHOS DE POLÍMEROS SEGÚN INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (INE).....	19
4.1.	Datos obtenidos	19
4.2.	Tablas según datos obtenidos.....	20
4.3.	Gráficas según datos obtenidos	24
4.4.	Análisis de datos obtenidos.....	26
5.	CARACTERÍSTICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA	29

5.1.	Contenido de bitumen (cemento asfáltico)	29
5.2.	Resistencia a la deformación	31
5.3.	Resistencia a la fatiga	32
5.4.	Resistencia al agrietamiento por temperatura	33
5.5.	Durabilidad	33
5.6.	Trabajabilidad	35
5.7.	Resistencia a la humedad.....	36
6.	ENSAYOS A REALIZAR PARA LA EVALUACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS Y DE LOS MATERIALES UTILIZADOS.....	39
6.1.	Metodología de Marshall.....	39
6.2.	Densidad específica bruta (Bulk)	39
6.3.	Densidad específica teórica máxima	40
6.4.	Resistencia al flujo plástico de mezclas asfálticas	40
6.5.	Porcentaje de vacíos (VA)	41
6.6.	Granulometría del polímero tereftalato de polietileno (PET).....	42
6.7.	Gravedad específica del polímero tereftalato de polietileno (PET)	43
6.8.	Peso volumétrico del tereftalato de polietileno (PET).....	43
6.9.	Características que deben cumplir los agregados en las mezclas asfálticas.....	44
6.9.1.	Gravedad específica bruta de los agregados ...	44
7.	PROCEDIMIENTO DEL MÉTODO MARSHALL.....	47
7.1.	Descripción de diseño de mezcla	47
7.2.	Descripción de la metodología para la elaboración de probetas de mezcla asfáltica	49

7.2.1.	Procedimiento para elaboración de probetas de mezcla asfáltica	55
7.3.	Descripción de la metodología para obtener la densidad específica bruta (Bulk).....	57
7.3.1.	Procedimiento para obtener la densidad específica bruta (Bulk)	58
7.4.	Descripción de la metodología para obtener la densidad teórica máxima.....	59
7.4.1.	Procedimiento para obtener la densidad teórica máxima	61
7.5.	Descripción de la metodología de porcentaje de vacíos ...	62
7.5.1.	Procedimiento para obtener el porcentaje de vacíos.....	63
7.6.	Descripción de la metodología de la prueba de estabilidad-flujo de Marshall	63
7.6.1.	Procedimiento de la prueba de estabilidad-flujo de Marshall	66
8.	DATOS OBTENIDOS Y CÁLCULOS A REALIZAR DE LOS ENSAYOS DEL MÉTODO MARSHALL	69
8.1.	Datos de la granulometría del diseño de mezcla	69
8.2.	Datos y resultados del ensayo de densidad específica bruta (Bulk)	72
8.3.	Datos y resultados de la densidad específica máxima teórica	77
8.4.	Datos y resultados de la gravedad específica del polímero tereftalato de polietileno (PET)	81
8.5.	Cálculo y resultados de la gravedad específica bruta de los agregados.....	82

8.6.	Cálculo y resultados del porcentaje de vacíos	83
8.7.	Resultados de la prueba estabilidad-flujo de Marshall	86
9.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	93
9.1.	Resumen de resultados	93
9.2.	Interpretación de resultados	98
9.2.1.	Mezcla asfáltica del diseño propuesto normal estándar	99
9.2.2.	Mezcla asfáltica del diseño con el polímero tereftalato de polietileno (PET)	101
	CONCLUSIONES	103
	RECOMENDACIONES	107
	BIBLIOGRAFÍA	109
	APÉNDICES	111
	ANEXOS	115

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Gráfica de eliminación de residuos sólidos en porcentaje del 2015.....	24
2.	Gráfica de porcentaje de desechos plásticos con base en los desechos sólidos totales en los departamentos relevantes en el 2015.....	25
3.	Gráfica de miles de toneladas de desechos relevantes de Guatemala para el 2015, en cada departamento.....	26
4.	Gráfica de los límites de graduación de los agregados para una granulometría tipo E	49
5.	Horno graduado utilizado para calentar los agregados, moldes y el bitumen (cemento asfáltico).....	51
6.	Equipo utilizado para calentar la mezcla asfáltica	51
7.	Guantes, recipiente y espátula para mezclar.....	52
8.	Termómetros adecuados para medir temperatura.....	52
9.	Balanza para pesar los materiales	53
10.	Batería de tamices	53
11.	Molde cilíndrico con collar de extensión y placa de base plana para formar las probetas	54
12.	Martillo de compactación de operación manual y pedestal para compactación	54
13.	Pileta de agua para la suspensión de probetas	57
14.	Balanza provista de dispositivo de suspensión	58
15.	Picnómetro de vacíos.....	60

16.	Bomba de vacío y manómetro de presión residual	61
17.	Mordazas de hierro	64
18.	Máquina de compresión para la rotura de las probetas	65
19.	Anillo dinamométrico	65
20.	Recipiente de control termostático	66
21.	Gráfica de la curva granulométrica del diseño propuesto normal estándar	70
22.	Gráfica de la curva granulométrica del diseño propuesto con tereftalato de polietileno (PET).....	72
23.	Gráfica de resultados de porcentaje de vacíos-densidad del diseño propuesto normal	84
24.	Gráfica de resultados de porcentaje de vacíos-densidad del diseño con tereftalato de polietileno (PET)	86
25.	Gráfica de resultados de prueba de estabilidad-flujo de Marshall para el diseño propuesto normal	88
26.	Gráfica de resultados de deformación Marshall para el diseño propuesto normal.....	89
27.	Gráfica de resultados de prueba estabilidad-flujo de Marshall para el diseño con tereftalato de polietileno (PET).....	91
28.	Gráfica de resultados de deformación Marshall para diseño con tereftalato de polietileno (PET).....	92
29.	Gráfica comparativo de densidad específica bruta (Bulk)	94
30.	Gráfica comparativo de densidad teórica máxima	95
31.	Gráfico comparativo de porcentaje de vacíos-densidad.....	96
32.	Gráfico comparativo de deformación Marshall	97
33.	Gráfico comparativo de estabilidad-flujo de Marshall.....	98

TABLAS

I.	Datos de densidad	2
II.	Datos de índice de fluencia	2
III.	Características del PET Y R-PET	3
IV.	Cálculo de peso en las proporciones usadas para la granulometría usada.....	4
V.	Ensayo de estabilidad y flujo de Marshall.....	5
VI.	Densidad de probetas de prueba con porcentaje de vacíos	5
VII.	Resultados de caracterización de asfalto convencional y modificado.....	7
VIII.	Identificación de polímeros según propiedades y usos más comunes	10
IX.	Formas de eliminar la basura en el año 2015, según el estudio ENCOVI del INE.....	21
X.	Porcentaje de diversos residuos sólidos domiciliarios en cada departamento, generados en el año 2015.	22
XI.	Estimación de desechos sólidos y plásticos domiciliarios en miles de toneladas, producidos en el 2015.....	23
XII.	Especificaciones de bitumen (cemento asfáltico)	30
XIII.	Cantidad de cemento asfáltico (ASTM D 3515).....	31
XIV.	Causas y efectos de la poca durabilidad	34
XV.	Causas y efectos de la mala trabajabilidad	35
XVI.	Causas y efectos de una mezcla demasiado permeable.....	37
XVII.	Graduación de los agregados para pavimentos asfálticos (ASTM D3515).....	48
XVIII.	Dosificación del diseño de granulometría tipo E normal estándar... ..	69

XIX.	Dosificación del diseño de granulometría tipo E con tereftalato de polietileno (PET)	71
XX.	Datos de densidad específica bruta (Bulk) para el diseño propuesto normal.....	73
XXI.	Datos de densidad específica bruta (Bulk) para el diseño con polímero tereftalato de polietileno (PET).....	74
XXII.	Resultados del ensayo de densidad específica bruta (Bulk) para diseño propuesto normal	75
XXIII.	Resultados del ensayo de densidad específica bruta (Bulk) para el diseño con tereftalato de polietileno (PET).....	76
XXIV.	Datos de densidad específica teórica máxima de diseño propuesto normal.....	78
XXV.	Datos de densidad específica teórica máxima del diseño con tereftalato de polietileno (PET).....	79
XXVI.	Resultados del ensayo de densidad teórica máxima para el diseño propuesto normal	80
XXVII.	Resultados del ensayo de densidad teórica máxima para el diseño con tereftalato de polietileno (PET)	81
XXVIII.	Datos y resultados de gravedad específica del polímero tereftalato de polietileno (PET).....	82
XXIX.	Resultados de porcentaje de vacíos del diseño propuesto normal..	83
XXX.	Resultados de porcentaje de vacíos del diseño con tereftalato de polietileno (PET)	85
XXXI.	Resultados de la prueba estabilidad-flujo de Marshall del diseño propuesto normal	87
XXXII.	Resultados de prueba de estabilidad-flujo de Marshall para el diseño con tereftalato de polietileno (PET)	89
XXXIII.	Cuadro comparativo de densidad específica bruta (Bulk)	93

XXXIV.	Cuadro comparativo de densidad específica teórica máxima	94
XXXV.	Cuadro comparativo de porcentaje de vacíos-densidad	95
XXXVI.	Cuadro comparativo de deformación Marshall	96
XXXVII.	Cuadro comparativo de estabilidad-flujo Marshall	97

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cS	<i>CentiStokes.</i>
G_{mb}	Densidad específica <i>bulk</i> de la mezcla asfáltica.
G_{mm}	Densidad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica.
G_{se}	Gravedad específica efectiva de los agregados.
kPa	Kilopascal.
lbf	Libras-fuerza.
A	Masa del espécimen de mezcla asfáltica.
B	Masa del espécimen de mezcla asfáltica saturado y con superficie seca.
C	Masa del espécimen de mezcla asfáltica sumergido en agua.
D	Masa del picnómetro lleno de agua.
E	Masa del picnómetro con la muestra y lleno de agua.
Pa-s	Pascales-segundo.
W_s	Peso material seco.
W_m	Peso matraz limpio y seco.
W_{ms}	Peso matraz con material seco.
W_{msw}	Peso matraz con suelo y agua.
W_{mw}	Peso matraz con agua.
VA	Porcentaje de vacíos.

psi

Pounds-force per square inch (libras-fuerza por pulgada cuadrada).

GLOSARIO

Aglomerante	Material que en estado pastoso y con consistencia variable, es capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto.
Agregado pétreo	Agregado proveniente de la trituración de roca, de piedra o de un peñasco.
Anillo dinamométrico	Instrumento utilizado para conocer la carga de compresión aplicada en una máquina de ensayo.
Bitumen	Aglomerante proveniente de la fracción pesada de la destilación del petróleo crudo.
Bomba de vacío	Máquina utilizada para extraer, impulsar o elevar moléculas de gas de un volumen sólido.
Contenido de asfalto	Cantidad de asfalto que se adiciona a la mezcla de agregados pétreos para obtener las cualidades deseadas de la mezcla.
Deformímetro	Instrumento que mide desplazamientos lineales.
Densidad	Relación que existe entre la masa y el volumen que ocupa una sustancia.

Estabilidad	Capacidad de la mezcla asfáltica para resistir desplazamiento y deformación bajo la aplicación de carga.
Fluencia	Deformación en centésimas de pulgada de la probeta, bajo la carga de estabilidad Marshall.
Granulometría	Distribución de los diferentes tamaños de las partículas de un agregado.
Gravedad específica	Propiedad obtenida de la comparación de la densidad de una sustancia con la densidad de una sustancia patrón.
INV	Instituto Nacional de Vías de Colombia.
Libro Azul	Documento guía para la realización de un diseño de mezcla asfáltica según los requerimientos de la Especificación General para Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos.
Ligante	Material cuya función es pegar o unir partículas de otros materiales.
Manómetro	Instrumento utilizado para medir la presión de un fluido, especialmente de los gases.

Pavimento flexible	Constituido con un material bituminoso como aglomerante y agregados pétreos.
<i>Performance Grade</i>	Es el grado de cemento asfáltico (bitumen) a utilizar, esto depende del clima para resistir fisuras o ahuellamiento por la temperatura en la región.
Picnómetro	Instrumento de medición utilizado para conocer la densidad o peso específico de un fluido líquido o sólido.
Probeta	Pieza sometida a ensayos para estudio del material del que está hecha.
Vacíos de aire	Espacios pequeños de aire o bolsas de aire, que están presentes entre las partículas de la mezcla asfáltica.
Viscosidad	Medida de la resistencia a la deformación de un fluido producida por fuerzas cortantes.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación, se realizó como un estudio teórico-práctico para la evaluación de las características físicas y propiedades mecánicas de un diseño de mezcla asfáltica con el método de Marshall, con granulometría tipo E de la sección 400 del “Libro Azul”, adicionando un porcentaje de agregado de tereftalato de polietileno (PET), estimado como referencia a la cantidad de agregado pétreo. Se evaluó la proporción que se utilizó y la representación que este ocupó en el diseño de mezcla asfáltica. Se llevó a cabo un diseño de mezcla asfáltica convencional y se comparó con el diseño de mezcla asfáltica, adicionando tereftalato de polietileno (PET), como agregado.

Con el desarrollo de este trabajo se pretendió dar un mejor uso a este material debido a que hay demasiada contaminación ambiental, siendo este el problema fundamental en el deshecho de envases plásticos reciclables no tratados. Es por ello que se trató de aplicar a un tratamiento productivo de uso con la interacción a las mezclas asfálticas, por medio del método de Marshall, el cual es muy utilizado actualmente en Guatemala para la producción de mezclas asfálticas.

Se evaluaron las características físicas y propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica convencional y de la mezcla asfáltica adicionando tereftalato de polietileno (PET) como agregado, además se verificó que los agregados utilizados para los diseños de mezcla asfáltica estuvieran en condiciones óptimas, de acuerdo a los procedimientos y especificaciones aplicables indicados por ASSHTO y ASTM.

OBJETIVOS

General

Comparar las propiedades mecánicas y características físicas de una mezcla asfáltica convencional y una mezcla asfáltica adicionando tereftalato de polietileno (PET) como agregado, con los parámetros requeridos en la sección 401 para mezclas asfálticas convencionales en caliente.

Específicos

1. Realizar e investigar la estadística de la cantidad aproximada de desechos del polímero tereftalato de polietileno (PET) que se genera en Guatemala.
2. Indicar y evaluar las condiciones y eficiencia del porcentaje óptimo del polímero tereftalato de polietileno (PET) para la dosificación de la mezcla asfáltica por el Método Marshall con granulometría tipo E de la sección 400 del “Libro Azul”.
3. Evaluar la resistencia de flujo de Marshall y la deformación que sufre la mezcla asfáltica con la adición del polímero tereftalato de polietileno (PET) para diferentes porcentajes de bitumen (cemento asfáltico).
4. Determinar la densidad Bulk, densidad teórica máxima y el contenido óptimo de vacíos de la mezcla asfáltica en caliente normal y de la mezcla asfáltica en caliente con tereftalato de polietileno (PET) y comparar con los

parámetros que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento.

INTRODUCCIÓN

La red vial en Guatemala es considerada como un factor importante de infraestructura que permite el desarrollo del país, en su mayoría está constituido por pavimento flexible, la cual es la parte de estructura conocida como carpeta asfáltica, es importante evaluar el comportamiento de la mezclas asfálticas en caliente más utilizadas en la construcción de pavimentos flexibles en nuestro país debido a varios factores como costo (es más barato que el pavimento rígido y tiene una ventaja fundamental, es reutilizable). Por otra parte, el polímero tereftalato de polietileno es un material termo plástico derivado de los polímeros elastómeros que, a su vez, son derivados del petróleo, este es utilizado para la fabricación de envases de gaseosas y de alimentos; esto produce grandes desperdicios y genera un problema de contaminación ambiental.

El polímero tereftalato de polietileno es un material que tiene antecedentes de compatibilidad con el pavimento asfáltico, lo cual conlleva el interés de este trabajo por el diseño de mezcla asfáltica adicionando el polímero tereftalato de polietileno. Se realizó un diseño de mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall con granulometría tipo E de la sección 400 del “Libro Azul”, orientado a la evaluación de la incorporación de un porcentaje adecuado del polímero tereftalato de polietileno (PET) como agregado en relación a volumen y el peso de los agregados pétreos para el diseño de mezcla asfáltica. Se evaluaron los resultados por medio de ensayos de laboratorio, comparando los datos obtenidos con las especificaciones que se encuentran en las normas y estudios para pavimentos, con lo cual se determinó técnicamente la cantidad apropiada de porcentaje del polímero tereftalato de polietileno en relación al volumen y peso de los agregados pétreos, con lo cual se logre el trabajo de manera eficiente para

mejorar las características físicas y propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica.

Se realizaron estudios para proponer el uso de este polímero resistente a la biodegradación que se considera un contaminante ambiental, y darle un uso aplicable al diseño de mezclas asfálticas, para disminuir los volúmenes de desperdicio del polímero en el país.

1. ANTECEDENTES

En el desarrollo del tema principal fue necesario realizar estudios previos, estos se llevaron a cabo con el fin de proporcionar información relacionada al tema, para brindar un amplio conocimiento de lo que son los polímeros, en especial el tereftalato de polietileno (PET) y la relación que tienen con las mezclas asfálticas.

1.1. Estudios previos del polímero tereftalato de polietileno en mezclas asfálticas en caliente

A continuación se presentan estudios previos realizados del polímero tereftalato de polietileno (PET) tomados en cuenta para la realización del trabajo investigativo y práctico, además del procedimiento que se empleó para el diseño de mezcla asfáltica en caliente y de la compatibilidad que tienen entre sí los materiales utilizados.

1.1.1. Ingeniería del reciclado en envases de tereftalato de polietileno (PET)

El trabajo fue desarrollado por el Ing. Nelson Rolando Colomo Ruiz, en el recopila información del reciclado de los polímeros, procedencia del material y su descubrimiento, además de su clasificación según la identificación de envases y su uso.

1.1.1.1. Resultados obtenidos

Se presentan los datos del trabajo de investigación con relación al polímero tereftalato de polietileno (PET).

Tabla I. Datos de densidad

Polímero	Densidad promedio del material virgen (g/cm ³)	Densidad promedio del material procesado (g/cm ³)	Densidad promedio del material reprocesado (g/cm ³)
LPDE	0,923	0,913	0,906
HDPE	0,926	0,917	0,913
PET	0,954	0,951	0,937
PP	0,904	0,884	0,875

Fuente: Norma ASTM.

Tabla II. Datos de índice de fluencia

Polímero	Fluencia del material virgen (g/10min)	Fluencia del material procesado (g/10min)	Fluencia del material reprocesado (g/10min)
LPDE	0,96	1,00	1,03
HDPE	12,00	12,36	12,70
PET	0,13	0,23	0,23
PP	1,80	2,04	2,27

Fuente: Norma ASTM.

Tabla III. **Características del PET Y R-PET**

Propiedad	PET virgen	R-PET
Módulo Young (Mpa)	1 890	1 630
Resistencia Rotura (Mpa)	47	24
Elongación (%)	3,2	110
Impacto (J m-1)	12	20
Temperatura (°C)	244-254	247-253
Peso molecular (mol)	81 600	58 400

Fuente: Norma ASTM.

1.1.1.2. Conclusiones

En el desarrollo de las conclusiones, detalló que el tereftalato de polietileno (PET) es un polímero de alta calidad, y requiere un proceso altamente complejo para su recuperación y utilización en otras áreas, pero con el proceso de reciclado del tereftalato de polietileno (PET), se tendrá la capacidad de procesar el material y convertirlo en productos alternativos. También de la implementación de nuevos códigos de colores en puntos de recolección y creación de módulos, se obtendrá el reciclado de manera sencilla en un futuro no muy cercano.

1.1.1.3. Recomendaciones

En el desarrollo de las recomendaciones, se detalló la indispensable responsabilidad ambiental con base a nuevas reformas legislativas, para que la recolección no sea una lucha, además se debe implementar los módulos de recolección para tener un buen impacto a la población; también la investigación de este trabajo de graduación deberá de fomentar la cultura del reciclado para tener un medio ambiente mejor que el actual.

1.1.2. Criterios del diseño de mezclas asfálticas en caliente

La tesis fue desarrollada por el Ing. José Luis León Fajardo, la investigación de forma práctica emplea del diseño de mezclas asfálticas, desarrolla las características principales y también los componentes de los pavimentos, se enfoca principalmente en el pavimento flexible, determina la calidad que deben de tener los agregados, como sus características para un diseño de mezcla asfáltica; además desarrolla el método de Marshall (ASTM D1559) para la composición de diseño de mezclas asfálticas.

1.1.2.1. Resultados obtenidos

Tabla IV. **Cálculo de peso en las proporciones usadas para la granulometría usada**

Porcentaje de bitumen	Cant. de bitumen en gramos	Porcentaje de agregados	Cantidad de agregado en gramos
4,5	51,83	95,5	1 048,17
5	57,89	95,0	1 042,11
5,5	64,02	94,5	1 035,98
6	70,21	94,0	1 029,79
6,5	76,47	93,5	1 023,53

Fuente: LEÓN FAJARDO, José Luis. *Criterios para el diseño de mezclas asfálticas en caliente*.

p. 75.

Tabla V. **Ensayo de estabilidad y flujo de Marshall**

Porcentaje de bitumen	Lectura del micrómetro	Carga en libras	Promedio en libras	Flujo	Promedio de Flujo
4,5	180	2 900	2 850	15	15
4,5	170	2 750		16	
4,5	180	2 900		15	
5	218	3 550	3 133	17	16
5	168	2 700		15	
5	193	3 150		18	
5,5	148	2 350	2 733	12	13
5,5	171	2 750		13	
5,5	191	3 100		15	
6	151	2 450	2 583	17	17
6	162	2 600		16	
6	168	2 700		19	
6,5	163	2 600	2 433	20	20
6,5	139	2 200		20	
6,5	157	2 500		19	

Fuente: LEÓN FAJARDO, José Luis. *Criterios para el diseño de mezclas asfálticas en caliente*. p. 76.

Tabla VI. **Densidad de probetas de prueba con porcentaje de vacíos**

Porcentaje de bitumen	Peso en el aire gramos	Peso en el agua gramos	Volumen en cm ³	Densidad g/cm ³	Promedio densidad g/cm ³	Porcentaje de vacíos
4,5	1 080,6	627,4	457,2	2,37	2,40	2,83
4,5	1 087,4	635,3	452,1	2,40		
4,5	1 067,1	628,2	439,3	2,43		
5	1 083,1	638,6	444,5	2,43	2,42	1,22
5	1 078,9	633,1	445,8	2,42		
5	1 087,0	638,6	448,4	2,42		
5,5	1 092,5	638,7	453,8	2,40	2,40	1,23
5,5	1 093,6	639,7	453,9	2,40		
5,5	1 092,4	637,8	454,6	2,40		

Continuación de la tabla VI.

6	1 076,5	627,6	448,9	2,39	2,38	1,24
6	1 077,1	626,5	450,6	2,39		
6	1 063,5	615,1	448,4	2,37		
6,5	1 083,4	629,1	454,3	2,38	2,38	0,41
6,5	1 080,4	627,8	452,6	2,38		
6,5	1 073,6	623,8	449,8	2,38		

Fuente: LEÓN FAJARDO, José Luis. *Criterios para el diseño de mezclas asfálticas en caliente*.
p. 76.

1.1.2.2. Conclusiones

En el desarrollo de las conclusiones se detalló que se debe llevar un control de la graduación de los agregados a utilizar, ya que influye directamente en la uniformidad de la mezcla asfáltica en las pruebas realizadas. Las probetas que tuvieron mayor estabilidad en las pruebas fueron las que tenían el porcentaje del 5,2 por ciento de bitumen (cemento asfáltico), además los métodos empleados en Guatemala son obtenidos de otros países, y por lo tanto, se deben adaptar a las condiciones y requerimientos de nuestro país el cual debe de tener un control de calidad alto para la producción del pavimento asfáltico.

1.1.2.3. Recomendaciones

En el desarrollo de las recomendaciones, se detalló que en Guatemala se ha intensificado la producción de pavimento asfáltico en construcción de obras viales, y se recomienda que la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, establezca cursos y laboratorios para proporcionar información sobre estos temas, además que se cumplan estrictamente la

producción y colocación del pavimento asfáltico, tomando como referencia los documentos establecidos en el país.

1.1.3. Asfaltos modificados con polímeros

El trabajo fue desarrollado por la Inga. Martha Dina Avellán Cruz. Enfoca la investigación de práctica para la modificación de asfaltos con polímeros, contiene la importancia de la modificación de asfalto, detalla las mejoras que se obtienen al realizar esta modificación y los tipos de polímeros utilizables para la modificación de asfalto, además explica las características y beneficios al utilizar el tipo de polímero seleccionado, el cual supervisa que sea factible en todos los aspectos requeridos.

1.1.3.1. Resultados obtenidos

Tabla VII. **Resultados de caracterización de asfalto convencional y modificado**

Prueba	Asfalto convencional AC-20	Asfalto modificado con polímero elastómero (AC-20E)	Asfalto modificado con polímero plastómeros (AC-20P)	Unidades
Penetración, 100 gr., 5 seg., 25°C	77	58	54	dmm
Penetración, 200 gr., 60seg., 4°C	5	28	20	dmm
Gravedad Especifica 60°F/60°F	1,063	1,053	1,053	adimensional
Gravedad API 60°F/60°F	1,6	1,6	1,58	°API
Pérdida de masa por calentamiento	0,89	2,1	2,1	porcentaje

Continuación de la tabla VII.

Viscosidad cinemática a 135°C	2 162,3	2 122	**	cP
Recuperación Elástica por Ductilómetro, 25 °C	10	85	10	porcentaje
Recuperación Elástica por Torsión, 25 °C	3	40	7	porcentaje
Punto de Ablandamiento	47	66	102	°C
Masa/Unidad de volumen	8,73	8,73	8,73	Lb/ gal

Fuente: AVELLÁN CRUZ, Martha Dina. *Criterios para el diseño de mezclas asfálticas en caliente*. p. 51,52.

1.1.3.2. Conclusiones

En las conclusiones, se detallan las especificaciones de los materiales utilizados, estos cumplen con las normas establecidas ASTM y AASHTO, además el uso de polímeros utilizados disminuye la susceptibilidad térmica del asfalto, el uso de los polímeros elastómeros mejora las propiedades físico-mecánicas del bitumen (cemento asfáltico) tipo AC-20, además de la mejora de la resistencia a la deformación plástica, dando un buen desempeño trabajando a altas temperaturas, y la recuperación elástica se mejora de manera notable.

1.1.3.3. Recomendaciones

En las recomendaciones, propone una nueva técnica para la utilización de polímeros en las mezclas asfálticas, y, por lo tanto desarrolla una técnica especial de pavimentación de carreteras para disminuir la capa de rodadura y la capacidad estructural; además de poder disminuir los costos de mantenimiento de las carreteras, es recomendable trabajar a una temperatura de 132 °C en la colocación de mezclas asfálticas, para que sean más trabajables.

2. POLÍMEROS








El término polímero tiene su origen de las palabras griegas, poli (muchos) y meros (parte), un polímero es un material que está compuesto por varias unidades repetidas de partes conectadas. El compuesto para la realización de un polímero es un monómero, esto quiere decir una partícula con una repetición continua.

El polímero existe por la agrupación de los monómeros que forman unas cadenas unidas, cada monómero debe tener la capacidad de unirse con otros dos iguales para que se establezca una reacción de polimerización.

2.1. Definición

Un polímero es un material de consistencia con alto peso molecular formado por la unión de muchas unidades pequeñas que se llaman monómeros. El número de partículas de polímeros que se repiten en una molécula grande se llama grado de polimerización. Se forman así moléculas gigantes que desarrollan formas con diversas cadenas. Los polímeros que contienen un elevado grado de polimerización se les llama altos polímeros. El enfoque de este material ha sido para su utilización comercial; su uso dependerá del costo y sus características. Existen varios tipos de polímeros según sus propiedades y los usos comunes (tabla VIII).

Tabla VIII. **Identificación de polímeros según propiedades y usos más comunes**

Símbolo	Tipo de plástico	Propiedades	Usos comunes
	PET: Tereftalato de polietileno	Contacto alimenticio, resistencia física, propiedades térmicas, ligereza.	Bebidas, refrescos y agua, envases para alimentos.
	HDPE: Polietileno de alta densidad	Poco flexible, resistente a químicos, opaco, fácil de pigmentar.	Algunas bolsas de supermercado, bolsas para congelar, envases para leche.
	PVC: Policloruro de vinilo	Es duro, resistente, puede ser claro, puede ser utilizado por solventes, se suaviza a los 80°C.	Envases para plomería, tubería, envases en general.
	LDPE: Poliestileno de baja densidad	Suave, flexible, traslúcido, se suaviza a los 70°C, se raya fácilmente.	Película de empaque, bolsas para basura.
	PP: Polipropileno	Difícil pero aun flexible, se suaviza a los 140°C, traslúcido, soporta solventes.	Bolsas para frituras, popotes, equipo para jardinería, cajas para alimentos.
	PS: Poliestileno	Claro, rígido, opaco, se rompe con facilidad, se suaviza a los 95°C. Afectado por grasas y solventes.	Cajas de discos compactos, cubiertos plásticos, imitaciones de cristal, juguetes.
	OTHER: Otros	Incluye muchas otras resinas y materiales. Sus propiedades dependen de la combinación de los plásticos.	Auto partes, hieleras, electrónica, piezas de empaque.

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos en <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/03/codigos-de-los-plasticos.html>. Consulta: 25 de octubre de 2016.

2.2. Clasificación de los polímeros

Los polímeros se clasifican por tres divisiones de sus propiedades, las cuales son:

- Por la estructura química.
- Por el comportamiento mecánico.
- Por el desempeño mecánico.

2.2.1. Por la estructura química

Se investiga un polímero en cuanto a la principal formación, el cual es la parte llamada mero (parte). Existen en dos formas que son, de enlace carbónica y de enlace heterogénea.

2.2.2. Por el comportamiento mecánico

Se investiga el comportamiento físico del material que exhiben, es decir sus características de resistencia, deformación, flexibilidad, etc. Se clasifican en:

2.2.2.1. Plásticos

Son materiales poliméricos que son muy sólidos cuando están a temperatura ambiente, estos materiales no soportan tan bien la deformación, pero tampoco tienden a la ruptura. Entre estos están: los adhesivos, las gomas, la bolsa plástica, el polipropileno, entre otros.

2.2.2.2. Elastómeros

Estos materiales muestran un comportamiento mecánico diferente a otros tipos de materiales, se estiran fácilmente cuando están a temperatura ambiente a causa de sus módulos de resistencia bajos, al aplicarle carga y producir un esfuerzo se comprimen, pero estos recobran su forma original al ser retirada la carga. Los cuales están: el tereftalato de polietileno, caucho, neopreno, entre otros.

2.2.2.3. Fibras

Estos materiales poliméricos son muy resistentes porque no se deforman mucho bajo cargas a tensión, por ejemplo: la fibra de carbono, el nylon y el poliéster.

2.2.3. Por el desempeño mecánico

En esta clasificación se verifica el desempeño de las propiedades mecánicas, como el comportamiento a un esfuerzo a tensión, en el cual trabajan muy bien los polímeros. Pero cuando se trata de otras propiedades, como las de compresión o flexión, la situación puede variar y ser totalmente distinta. Como por ejemplo, las fibras del polímero poseen alta resistencia a la tensión y también buena resistencia a la flexión, pero por lo general exhiben una mala resistencia a la compresión. Además tienen buena resistencia a tensión sólo en la dirección de las fibras, pero dependerá de la formación del material.

2.3. Polímeros compatibles con mezclas asfálticas

La combinación entre los polímeros y las mezclas asfálticas es susceptible a prestaciones óptimas, donde se debe de seleccionar cuidadosamente la mezcla asfáltica base (es necesario que los polímeros sean compatibles con los materiales de una mezcla asfáltica). El tipo de polímero, la dosificación, la elaboración y condiciones de almacenaje. Cada polímero actúa de diferente forma, si se añade un polímero a dos diferentes mezclas asfálticas, las características físicas y las propiedades mecánicas de los productos finales pueden ser muy diferentes. Para mayor efectividad, el polímero debe crear una red de unión continua de trabajo en la mezcla asfáltica; para que esto ocurra, la compatibilidad del polímero y la mezcla asfáltica debe ser exacta.

Los polímeros compatibles producen rápidamente una mezcla asfáltica estable, usando las técnicas tradicionales de preparación, como lo es el método de Marshall. Cuando se realiza un diseño de mezcla asfáltica con el equipo apropiado, las propiedades del ligante reducen el efecto de desprendimiento de pétreos y el material adicinante, así como el incremento de vida útil del pavimento, debido a mayor estabilidad y menor fatiga.

3. TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET)

El tereftalato de polietileno (PET) fue descubierto y patentado como un polímero elastómero por J.R. Whinfield y J.T. Dickson, en el año 1941.

3.1. Definición

El tereftalato de polietileno (PET) es un tipo de poliéster que contiene alto peso molecular, es uno de los materiales que más se utilizan para la fabricación de botellas; las nuevas tendencias tecnológicas permitieron adelantar el proceso de soplado de envases, tornando el material aún más competitivo comercialmente en su proceso de moldeo. Las características y propiedades de barrera de la resina tereftalato de polietileno (PET) son progresivamente mejoradas por medio de la aplicación de revestimientos aprobados para no contaminar el medio ambiente; estos pueden ser de aplicación interna o externa, permitiendo el reemplazo potencial del vidrio y de envases de metal.

El tereftalato de polietileno (PET) es un polímero con un comportamiento excelente, ya que en su elaboración se generan muy pocos desperdicios y, por su composición química, su elaboración permite un determinado grado de regeneración.

3.2. Degradación y reciclaje del tereftalato de polietileno (PET)

El tereftalato de polietileno (PET) es un material resistente a la biodegradación debido a la alta cristalinidad de sus componentes y moléculas, por lo cual se considera no biodegradable, y su periodo de descomposición está

entre los 100 años y los 1 000 años, dependiendo su exposición al medio ambiente. Por otra parte, el tereftalato de polietileno (PET) sí puede ser degradado solo mediante un proceso químico por el cual cambia su estructura molecular, para reutilizarlo en un nuevo producto.

Cuando el material es expuesto en el medio ambiente, la luz ultravioleta generada por el sol da la energía que acciona y empieza la incorporación de oxígeno en sus moléculas. Este proceso hace que el material sea frágil y se rompa en trozos más pequeños hasta que las cadenas poliméricas alcanzan un peso molecular suficientemente deficiente para que puedan ser deshechas por microorganismos.

Reunir materiales de desecho es igual al reciclado de los mismos, con el fin de volver a utilizarlos de alguna manera. Sin embargo la recolección es el primer paso de la industria del reciclado y el fundamental. El reciclado del tereftalato de polietileno (PET) es un proceso en el cual se transforma el material de desperdicio en otro material que puede ser de utilidad; en otras palabras, darle un nuevo uso a lo que ha sido predispuesto como material inservible o basura. El reciclado del envase de tereftalato de polietileno (PET) para pos consumo es una acción viable, tanto técnica como medio ambientalmente, ya que da lugar a un producto con un importante valor añadido y contribuye a disminuir la generación de residuos.

En el área rural se tiene la costumbre de enterrar o quemar los desechos sólidos cuando el servicio municipal no presta el servicio de extracción de los desechos, a pesar de que las municipalidades tratan la manera de aumentar el interés y la voluntad de dar continuidad a este servicio.

La necesidad principal es concretar una forma efectiva para poder recolectar la mayor cantidad de plástico que se consume, siendo esta la iniciación para empezar una recolección. Existen varios métodos efectivos para la recolección en un lugar específico, para que puedan ser transportados a un centro final, es decir una bodega donde serán procesados los desechos. Estos métodos se distinguen en función de un lugar acoplado al equipo para procesar los desechos y los hábitos que tenga la población.

Entre los beneficios por utilizar material que ha sido reciclado, podemos mencionar, la disminución de la contaminación en afluentes, áreas verdes y el generar una cultura del reciclado.

3.3. Propiedades de polímero tereftalato de polietileno (PET)

Los envases de polímero son más reducidos económicamente y fáciles de producir con respecto de otros materiales. Siendo con estos que son más ligeros que otros materiales, se obtienen beneficios como la reducción de los costos para transporte. El plástico ha sustituido varios materiales, permitiendo que la preparación de comida sea efectuada y comercializada instantáneamente.

Los primeros envases de tereftalato de polietileno (PET) aparecen en el mercado alrededor de 1977 y desde su principio hasta nuestros tiempos, el envase ha puesto una nueva revolución en el mercado y se ha convertido en el envase ideal para la distribución contemporánea.

Estos envases resultan en esencia ser adecuados para contener líquidos a presión, siendo el envasado de bebidas carbonatadas su principal aplicación. Por otra parte, el bajo costo de fabricación y el desarrollo de nuevas tecnologías que mejoran las características y propiedades de los productos de tereftalato de

polietileno (PET) han permitido un crecimiento notable del número de sus aplicaciones.

3.4. Preparación de tereftalato de polietileno (PET) para mezclas asfálticas

El cemento asfáltico con las características y propiedades de la mezcla, debe ser diseñado eligiendo el polímero correcto para una determinada aplicación, asegurándose que es compatible con el asfalto base. En general, se eligen elastómeros, lo cual es la familia del tereftalato de polietileno (PET), para proporcionar mayor resiliencia y flexibilidad al pavimento; mientras que los resultados con los elastómeros generan una mezcla de alta estabilidad y rigidez. Los resultados obtenidos de un proceso de modificación de asfalto dependen altamente de la concentración, peso molecular, composición química y orientación molecular del tereftalato de polietileno (PET), así como la fuente del crudo, del proceso de refinación y del grado del asfalto que se utiliza.

Cuando se añaden polímeros como el tereftalato de polietileno (PET) al asfalto, las propiedades del asfalto dependen de los siguientes parámetros:

- Tipo de polímero a emplearse, ya sea elastómeros o plastómeros
- Su forma física
- Naturaleza y grado de asfalto
- Tipo de equipo a utilizar
- Tiempo y temperatura durante el mezclado
- La compatibilidad de mezcla asfáltica-polímero

4. ESTADÍSTICA APROXIMADA DE DESECHOS DE POLÍMEROS SEGÚN INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (INE)

A continuación se detalla una aproximación estadística de los desechos de polímeros. Con datos obtenidos de este estudio se realizaron comparaciones y un análisis detallando del problema ambiental.

4.1. Datos obtenidos

Con datos tomados como referencia en nuestro país en el estudio en nuestro país aproximadamente se genera de 12 000 a 14 000 toneladas métricas de desechos sólidos al día.¹ Revisando estudios recopilados del Instituto Nacional de Estadística en su folleto Caracterización Departamental, un porcentaje de residuos sólidos creciente fue de un 2,4 % (porciento) en el año 2012 referenciado a lo producido en el año 2011 el cual fue de 2 017 481 toneladas métricas, además en el año 2013 con la implementación de programas ambientales disminuyó a un 1,8 % (porciento) de residuos sólidos con referencia a lo producido en el año 2012 el cual fue de 516 212 toneladas métricas.²

A estos datos se añadió una tabla relacionada con los datos estadísticos de la forma de eliminación de desechos sólidos para cada departamento en el país, con datos obtenidos en Encuesta Nacional de Condiciones de Vida (ENCOVI) del Instituto Nacional de Estadística (INE) producidos en el año 2015; esto evidencia

¹ COLOMO RUIZ, Nelson Rolando. *Ingeniería del reciclado en envases de tereftalato de polietileno (PET)*, p. 15.

² Instituto Nacional de Estadística. *Caracterización Departamental*, p. 138.

el problema serio en el que nuestro país se encuentra, con la falta de interés y educación que tenemos los guatemaltecos en relación al manejo de desechos sólidos que producimos cada año (tabla IX).

El porcentaje de desechos sólidos plásticos totales en cada departamento son relativamente constantes (tabla X), en comparación a los demás datos anuales de desechos producidos en el año 2015, obtenidos en el estudio más reciente de *Compendio Estadístico Ambiental de Guatemala* del Instituto Nacional de Estadística. A esto se le aplicó una operación aritmética, específicamente a los datos de distribución en miles de toneladas a nivel departamental. Obtuvimos los miles de toneladas de desechos de plástico anuales producidos en cada departamento en el 2015 (tabla XI).

En Guatemala, reunir los desechos sólidos es uno de los problemas comunes y más claros en cuanto a las cantidades exageradas producidas al año, tanto en plástico como en otros desperdicios sólidos. La solución será la disposición que tiene la población por determinar el destino final de los desperdicios, lo cual dependerá de la educación, conciencia y la importancia que tenga cada persona por ayudar al país.

4.2. Tablas según datos obtenidos

A continuación se muestran tablas de datos importantes utilizados obtenidos en estudios más actuales, para la realización de un análisis más completo.

Tabla IX. **Formas de eliminar la basura en el 2015, según el estudio ENCOVI del INE**

Departamento	Formas de eliminar desechos sólidos		
	Servicio municipal en porcentaje	La queman en porcentaje	La tiran en la calle en porcentaje
Guatemala	29,5	13,4	57,2
El Progreso	31,9	48,2	19,9
Sacatepéquez	41,3	12,1	46,6
Chimaltenango	17,0	33,2	49,8
Escuintla	17,0	45,5	37,5
Santa Rosa	20,6	56,6	22,8
Sololá	33,9	48,1	18,0
Totonicapán	14,4	52,2	33,3
Quetzaltenango	33,3	41,4	25,2
Suchitepéquez	10,1	53,3	36,7
Retalhuleu	7,0	70,9	22,1
San Marcos	11,8	61,1	27,1
Huehuetenango	14,5	53,9	31,6
Quiché	18,6	52,0	29,4
Baja Verapaz	7,1	70,3	22,6
Alta Verapaz	7,3	66,2	26,5
Petén	1,9	85,8	12,4
Izabal	15,3	67,2	17,6
Zacapa	40,8	43,3	15,9
Chiquimula	16,0	41,6	42,4
Jalapa	9,3	41,2	49,5
Jutiapa	19,5	58,6	21,9

Fuente: Encuesta Nacional de Condiciones de Vida (ENCOVI). *Principales formas de eliminación de basura anualmente.* p. 6.

Tabla X. **Porcentaje de diversos residuos sólidos domiciliarios en cada departamento, generados en el 2015**

Departamento	Alimento	Papel y cartón	Madera	Plástico	Cuero	Vidrio	Textiles	Ripio
Guatemala	34,2	18,6	2,9	17	2	2,8	9,3	13,2
El Progreso	47,1	16,4	6,4	16,4	0,3	2,8	4,2	6,4
Sacatepéquez	51	12,5	6,3	11	3,9	3,6	5,5	6,3
Escuintla	26,3	13,8	22,3	15,3	1,8	7,5	7,3	6
Santa Rosa	48,3	12	4,3	18,3	2	4,3	5,7	5
Sololá	41,3	13,3	6,3	23,3	2,3	4,7	3,9	4,8
Retalhuleu	36,8	20,3	9,4	11,7	2,9	5	7,6	6,3
San Marcos	40,2	14,3	8,4	18,4	4,2	4,5	4	5,9
Huehuetenango	38,6	17	4,9	26,4	2,3	4	4,6	2,3
Quiché	49,2	10,4	5,3	15,9	3,2	4,2	5,8	6,1
Baja Verapaz	32,5	17,5	2,5	20	1	12,5	4	10
Alta Verapaz	41,9	17,1	8,2	17	4,2	4,8	4,7	9
Petén	23,3	22	15,5	18,5	2,5	5,5	5,3	7,5
Zacapa	49,7	14,3	6,7	18,3	0,7	2	1,7	6,7
Jalapa	31,5	18,5	5	12,5	6	11	9	6,5
Jutiapa	42,9	12,5	4,2	11,8	3,4	3,4	6,2	15,5

Fuente: elaboración propia con base en datos obtenidos en el documento del INE, Sección de Estadísticas Ambientales, *Compendio Estadístico Ambiental 2015*. p. 182-185.

Tabla XI. **Estimación de desechos sólidos y plásticos domiciliarios en miles de toneladas, producidos en el 2015**

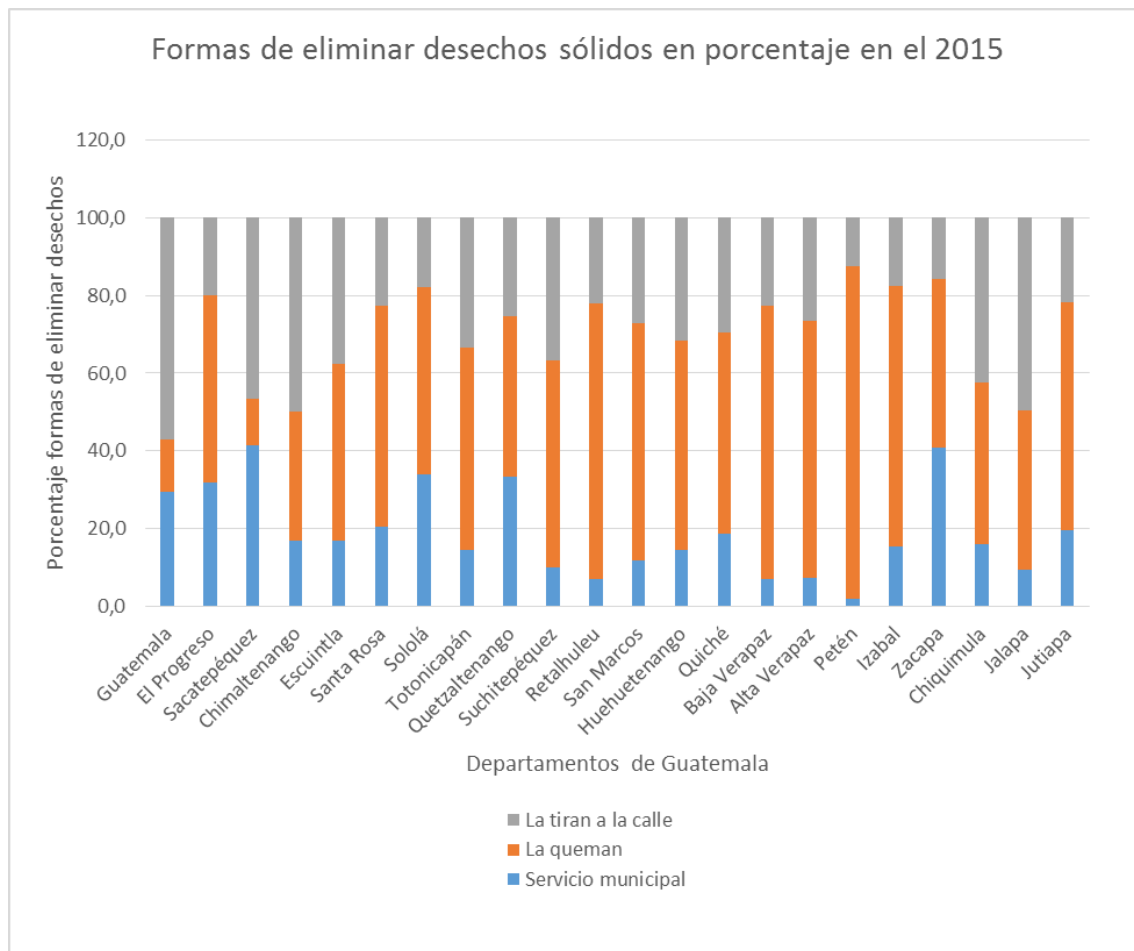
Departamento	Miles de ton. de sólidos generados	Miles de ton. de plástico generados
Guatemala	482,7	82,059
El Progreso	20,6	3,378
Sacatepéquez	20,9	2,299
Escuintla	103,5	15,836
Santa Rosa	45,6	8,345
Sololá	54,1	12,605
Retalhuleu	45,2	5,288
San Marcos	152	27,968
Huehuetenango	108,2	28,565
Quiché	134,6	21,401
Baja Verapaz	33	6,60
Alta Verapaz	138	23,460
Petén	39	7,215
Zacapa	20,7	3,788
Jalapa	44,2	5,525
Jutiapa	59,1	6,974
TOTAL	1501,4	261,307

Fuente: elaboración propia con base en datos obtenidos en el documento del INE, Sección de Estadísticas Ambientales, *Compendio Estadístico Ambiental 2015*. p. 186.

4.3. Gráficas según datos obtenidos

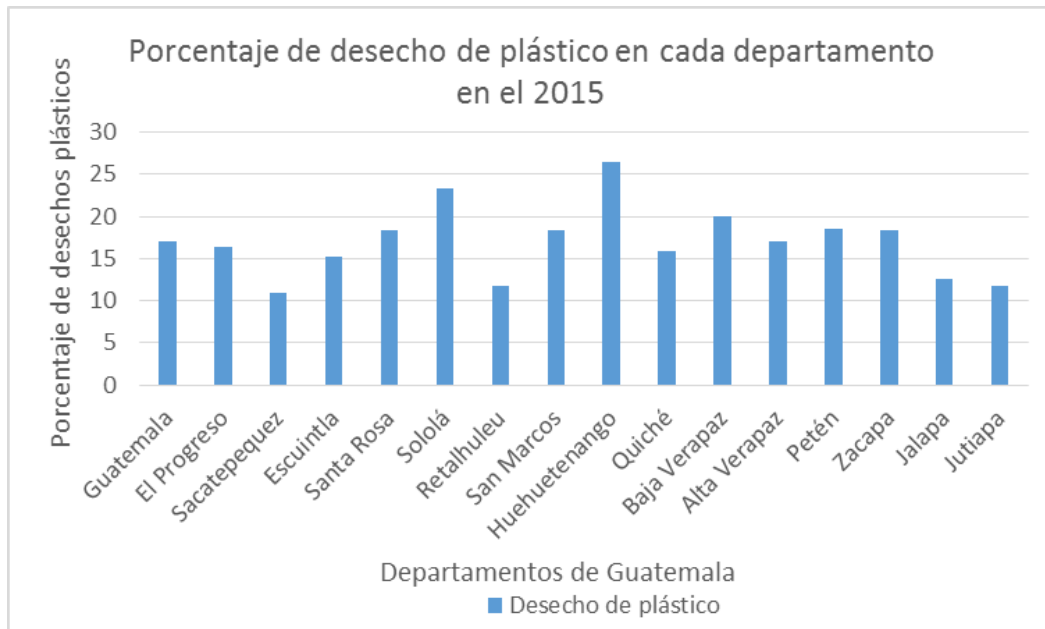
A continuación se muestran gráficas con base de los datos y tablas anteriores para una comprensión más completa.

Figura 1. **Gráfica de eliminación de residuos sólidos en porcentaje de 2015**



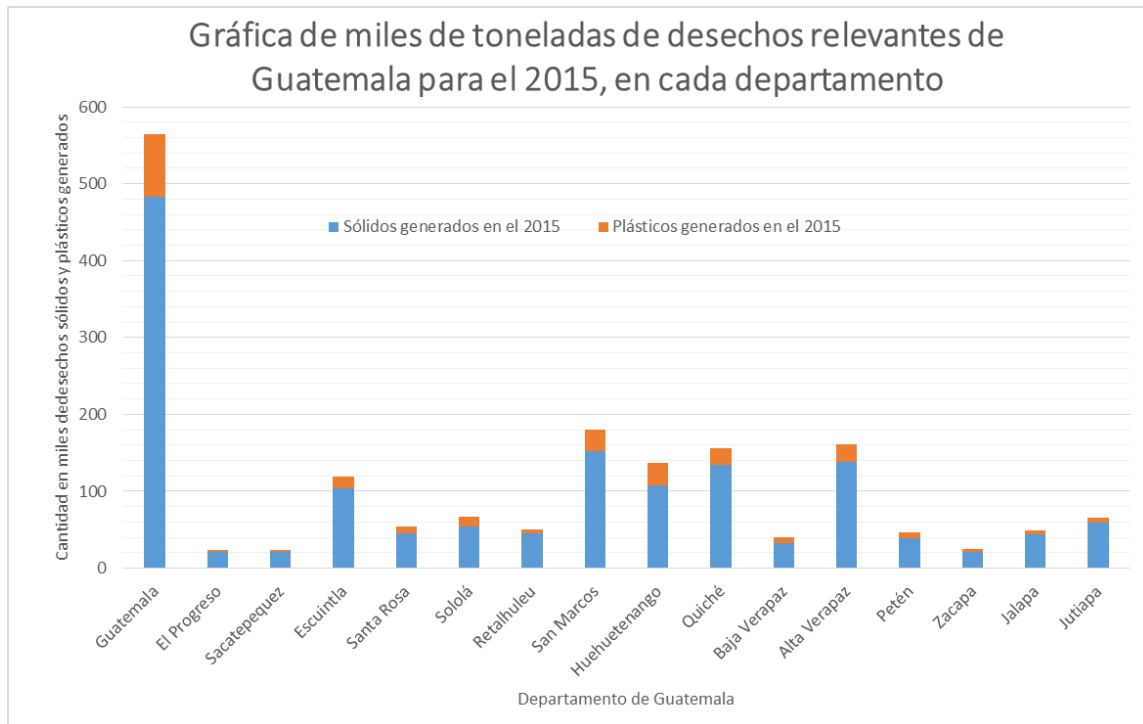
Fuente: elaboración propia con base en datos obtenidos en el documento de ENCOVI (Encuesta Nacional de Condiciones de Vida) 2015. *Principales formas de eliminación de basura anualmente.* p. 6.

Figura 2. **Gráfica de porcentaje de desechos plásticos en los departamentos relevantes en el 2015**



Fuente: elaboración propia con base en datos obtenidos en el documento del INE, Sección de Estadísticas Ambientales, *Compendio Estadístico Ambiental 2015*. p. 182-185.

Figura 3. **Gráfica de miles de toneladas de desechos relevantes de Guatemala para el 2015, en cada departamento**



Fuente: elaboración propia con base en datos obtenidos en el documento del INE, Sección de Estadísticas Ambientales, *Compendio Estadístico Ambiental 2015*. p. 186.

4.4. Análisis de datos obtenidos

En la actualidad se realizan diferentes actividades y proyectos para motivar a la población al manejo apropiado de los desechos sólidos producidos, pero es demasiada la cantidad de desechos sólidos y plásticos que se producen, debido a las necesidades de las personas de consumir productos con envase plástico. Realizando un conteo aproximado la cantidad de envases de tereftalato de polietileno (PET) que utilizan las personas es de 1 a 2 envases diarios, cabe mencionar que una cantidad de 20 botellas hacen la equivalencia aproximada de

una libra de masa de tereftalato de polietileno (PET). Otro dato importante es la evaluación masa-volumen, en el cual un envase de agua de 1500 cm³ equivale de 37 a 39 gramos del polímero tereftalato de polietileno (PET).³ El poco peso con relación al del producto adquirido es aproximadamente 50 veces menos que el líquido contenido (lo que implica un importante ahorro en transporte de mercaderías), por eso es barato y las personas tienen un fácil acceso a un producto con envase de tereftalato de polietileno (PET) que con uno de vidrio o aluminio, es por ello que el porcentaje continuo de manejo de desechos sólidos en cada departamento de Guatemala y esencialmente el manejo de desechos plásticos, evaluado anteriormente, son cantidades masivas de desperdicio para las cuales las personas utilizan formas fáciles de eliminarlos, como quemándolos y produciendo gases dañinos a la salud y al medio ambiente; estos gases contaminan el aire produciendo enfermedades respiratorias a la población. Otra forma es tirándolos en la calle produciendo contaminación acentuando el volumen que ocupa.

Por otra parte, el material puede ser fácilmente reciclado, depositándolo en bolsas o botes de basura adecuados y exportándolos a una planta de recolección de plástico, donde tratan y reciclan el plástico para su nueva utilización; también es posible el reciclado en plantas de recuperación de energía. En este caso, el tereftalato de polietileno (PET) genera el calor equivalente al carbón de grado inferior. Se debe tener un estricto control en plantas específicas debido que en esos lugares se contiene o almacena los gases que son dañinos para el medio ambiente. En casos ambientales tienen como finalidad la recolección de los envases con el propósito de la recuperación del material.

³ COLOMO RUIZ, Nelson Rolando. *Ingeniería del reciclado en envases de tereftalato de polietileno (PET)*, p. 12, 13.

Estudios indican que este material puede reutilizarse tras la separación de sus componentes para productos tales como fibras de relleno, resinas de poliéster y otros productos de uso no crítico.

5. CARACTERÍSTICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA

Las mezclas asfálticas en caliente elaboradas en laboratorio, se analizan de manera que se evalúa el comportamiento y desempeño cercano al de una estructura de carpeta asfáltica o pavimento en campo, de tal forma que se logre obtener las características físicas y propiedades mecánicas que se desean.

La razón primordial de evaluar la mezcla es dar una garantía factible que la mezcla de pavimentación en campo tenga las características y propiedades requeridas. Estas se explican a continuación.

5.1. Contenido de bitumen (cemento asfáltico)

El bitumen (cemento asfáltico) es un material de color negro, cementante, que cambia ampliamente en consistencia, está la variación de sólido y semisólido (sólido blando); la clasificación se detalla en el tipo y grado de bitumen (cemento asfáltico) que existe (tabla XII), según las características ambientales de la ubicación para la construcción de carreteras con pavimento flexible. Cuando se calienta el bitumen (cemento asfáltico) a una temperatura considerable, este se ablanda y se transforma en estado líquido, lo cual permite cubrir por completo las partículas de agregado durante la producción de mezcla asfáltica en caliente.

Tabla XII. **Especificaciones de bitumen (cemento asfáltico)**

Tipo y grado del cemento asfáltico	Especificación
Graduación por viscosidad:	AASHTO M 226
• AC-10	
• AC-20	
• AC-40	
Graduación por penetración:	AASHTO M 20
• 40-50	
• 60-70	
• 85-100	
• 120-150	AASHTO MP 1
Graduación PG (<i>Performance Grade</i>):	
• 64-22	
• 70-22	
• 76-22	
• 82-22	

Fuente: Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos. *Especificaciones de Cemento Asfáltico*, pág. 302.

En la proporción de bitumen (cemento asfáltico) primordial debe ser calculada la cantidad específica a utilizar en el laboratorio, y luego supervisada cuidadosamente en obra. Esto dependerá de la granulometría a utilizar para el diseño de mezcla asfáltica, según las *Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes* de la Dirección General de Caminos, esto conlleva a seleccionar un rango de tamaño de agregado nominal que será utilizado para el diseño de mezcla asfáltica, al igual el rango de bitumen en relación al peso de los agregados pétreos. El contenido de bitumen en una mezcla particular se establece usando criterios por el método de diseño en que se trabajará (tabla XIII).

Tabla XIII. **Cantidad de cemento asfáltico (ASTM D 3515)**

	Graduación designada y tamaño máximo nominal del agregado a utilizar					
Tipo de granulometría	A (50,8 mm)	B (38,1 mm)	C (25,4 mm)	D (19 mm)	E (12,5 mm)	F (9,5 mm)
Tamaño máximo del agregado	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"
Porcentaje de bitumen	2-7	3-8	3-9	4-10	4-11	5-12

Fuente: Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos. *Cantidad de Cemento Asfáltico*, pág. 308.

El contenido óptimo de bitumen para una mezcla, depende en gran parte de las características de los agregados, tales como granulometría y la capacidad de absorción, entre otros. Cuando la granulometría de los agregados sea más fina del diseño de mezcla, mayor será el área total a cubrir de los agregados pétreos; añadiendo las características de absorción de los agregados pétreos, mayor será la cantidad de bitumen (cemento asfáltico) requerido para cubrir por completo uniformemente todas las partículas. Por otra parte, las mezclas más gruesas exigen la menor cantidad de bitumen (cemento asfáltico) debido a que poseen menos área superficial total que cubrir.

5.2. Resistencia a la deformación

Las deformaciones en el pavimento asfáltico flexible se visualizan en canales que se forman longitudinalmente en dirección al paso de los vehículos, exactamente en las huellas por donde giran los neumáticos sobre el pavimento asfáltico.

Estos canales formados simbolizan la acumulación de pequeñas deformaciones generadas por aplicaciones de carga que provienen de la misma circulación de vehículos sobre la superficie del pavimento asfáltico y esto

ocasiona uno de las formas de deterioro y desgaste que más preocupa en el estudio del comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente.

Las deformaciones se caracterizan principalmente por una sección transversal de la superficie del pavimento asfáltico que ya no ocupa su posición original, asociado a temperaturas relativamente altas. Para esto se necesita que la mezcla esté elaborada con un bitumen (cemento asfáltico) de fuerte consistencia. El comportamiento de las mezclas asfálticas frente a la formación está íntimamente relacionado con el tipo de bitumen (cemento asfáltico), la composición granulométrica, calidad de los agregados pétreos y aditivos (en ciertos casos) empleados en la fabricación de la mezcla asfáltica en caliente.

5.3. Resistencia a la fatiga

La resistencia a la fatiga se define como la capacidad de un pavimento asfáltico para soportar el esfuerzo a flexión continuamente, causada por las cargas de los vehículos. Otro parámetro relacionado al estudio de resistencia a la fatiga es el porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica, por lo que si aumenta, ya sea por diseño o por poca compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento disminuye. Las mezclas asfálticas con una granulometría densa presentan una mayor resistencia a la fatiga que las mezclas asfálticas más finas. El tiempo de envejecimiento y endurecimiento del bitumen en la carpeta de rodadura es otro parámetro que da como resultado menor resistencia a la fatiga.

Las características de resistencia, el espesor de un pavimento y la capacidad de soporte de capa de sub-rasante, influyen determinantemente en la vida útil de una carpeta de rodadura asfáltica. Si fuera el caso de tener la carpeta asfáltica que presente buena resistencia a la fatiga y la capa de la sub base esté mal compactada, se verá con claridad los asentamientos y la resistencia a la fatiga

disminuirá considerablemente. En caso contrario, si la capa de sub base esté bien compactada y la carpeta asfáltica presenta mala resistencia a la fatiga, esta automáticamente se dañará. Por lo que el pavimento debe trabajar en conjunto para que pueda soportar el esfuerzo a flexión causada por los vehículos.

5.4. Resistencia al agrietamiento por temperatura

Uno de los factores principales en tomar cuenta es la temperatura funcional del asfalto, que es relativamente un factor muy importante, así como la variación de temperatura que en ocasiones pueden ser cambiados debido a la conducción de calor en la mezcla, el cual si es mayor la conducción de calor, la mezcla será mejor conductor de calor uniforme, así como la reflectividad, por medio del agregado seleccionado, lo que afecta a la deformación de los pavimentos. Por otra parte, cuando hay bajas temperaturas, depende principalmente de la rigidez de la mezcla asfáltica para no agrietarse en estas condiciones.

5.5. Durabilidad

La durabilidad se define como la propiedad de una mezcla asfáltica para soportar los efectos provocados por factores como el agua, aire, temperatura y las cargas debidas a los vehículos. Los efectos que perjudican provocan desintegración y desprendimiento de los agregados al pavimento, tambien provocan un cambio en las propiedades del bitumen como la polimerización oxidación y envejecimiento, entre otros.

Las siguientes características son las que influyen en la mejora de la durabilidad de una mezcla asfáltica, los cuales se detallan a continuación:

- Utilizado un contenido óptimo de bitumen (cemento asfáltico): este aumenta la durabilidad de la mezcla asfáltica, ya que las partículas de los agregados pétreos están cubiertas por una capa o película gruesa de bitumen (cemento asfáltico). Esto previene el envejecimiento y el endurecimiento de la mezcla asfáltica, reteniendo más tiempo las características y propiedades originales tanto del bitumen (cemento asfáltico) como de los agregados pétreos.
- Utilizando una granulometría densa: esta proporciona un acercamiento de contacto entre las partículas de agregados, mejorando así la propiedad de impermeabilidad de la mezcla.
- Diseñando y compactando la mezcla asfáltica en caliente para obtener la máxima propiedad de impermeabilidad: esta se logra mediante la compactación por medios mecánicos utilizando el más adecuado.

Tabla XIV. **Causas y efectos de la poca durabilidad**

Causas	Efectos
Bajo contenido de bitumen (cemento asfáltico).	Endurecimiento rápido del asfalto y desintegración por pérdida de agregado.
Alto contenido de vacíos debido al diseño o a la falta de compactación.	Endurecimiento temprano del asfalto seguido por agrietamiento o desintegración.
Agregado susceptibles al agua (hidrofilitos).	Películas de asfalto se desprenden del agregado dejando una carpeta de rodadura desgastada o desintegrada.

Fuente: Asphalt Institute. *Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente*, MS 22, 2015. p. 125.

5.6. Trabajabilidad

La trabajabilidad es un parámetro el cual da la sencillez de una mezcla asfáltica para ser colocada y compactada. Las mezclas asfálticas que tienen buena trabajabilidad son factibles de colocar y compactar; por otro lado las mezclas asfálticas con mala trabajabilidad son difíciles y complicadas de colocar y compactar. Las mezclas asfálticas con una granulometría gruesa (mezclas asfálticas que contienen un alto porcentaje de agregado grueso) tienen una línea de tendencia de segregarse en el tiempo de su manejo, y también pueden ser muy complicadas de compactar. El bitumen (cemento asfáltico) no es la principal causa de los problemas para la trabajabilidad.

Tabla XV. **Causas y efectos de la mala trabajabilidad**

Causas	Efectos en la carpeta
Tamaño máximo de partícula: grande.	Superficie áspera, difícil de compactar.
Demasiado agregado grueso.	Puede ser difícil de compactar
Temperatura muy baja de mezcla.	Agregado sin revestir, mezcla poco durable; superficie áspera, difícil de compactar.
Demasiada arena de tamaño medio.	La mezcla se desplaza bajo la compactadora y permanece tierna o blanda.
Bajo contenido de relleno mineral.	Mezcla tierna, altamente permeable.
Alto contenido de relleno mineral.	Mezcla muy viscosa, difícil de manejar; poco durable.

Fuente: Asphalt Institute. *Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente*, MS 22, 2015. p. 129.

La temperatura de la mezcla asfáltica es un factor que afecta la viscosidad del bitumen (cemento asfáltico), cuando hay una temperatura demasiado baja este hará que la mezcla disminuya la trabajabilidad, mientras que cuando hay una temperatura demasiado alta este podrá hacer que la mezcla se vuelva muy floja. Cuando el grado y el porcentaje de bitumen (cemento asfáltico) son variables, también sería un factor que puede afectar la trabajabilidad de la mezcla.

Para una buena trabajabilidad y colocación se requieren pavimentos asfálticos con temperaturas altas, se recomienda que estén en un rango de los 150 grados centígrados, esto dependerá según la viscosidad del bitumen (cemento asfáltico); se calientan también los agregados pétreos para que el asfalto no disminuya su temperatura al tener contacto con ellos. La colocación en obra se realiza con temperaturas muy elevadas a la temperatura ambiente, porque si no se realiza, estos materiales no pueden extenderse y mucho menos compactarse adecuadamente.

5.7. Resistencia a la humedad

La resistencia a la humedad de una mezcla asfáltica, es la característica de una carpeta asfáltica (pavimento) al paso del agua, hacia su interior o a través de él. La propiedad del contenido de vacíos es un factor de indicación a la susceptibilidad de una mezcla asfáltica compactada al paso del agua.

Tabla XVI. **Causas y efectos de una mezcla demasiado permeable**

Causas	Efectos en la carpeta
Alto contenido de vacíos en la mezcla de diseño.	El agua y el aire pueden entrar fácilmente en la carpeta asfáltica, causando oxidación y desintegración de la mezcla
Compactación inadecuada.	Resultará en vacíos altos en la carpeta asfáltica, lo cual conducirá a infiltración de agua y baja estabilidad.

Fuente: Asphalt Institute. *Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente*, MS 22, 2015. p. 126.

El ensayo de Stripping o la separación entre el bitumen (cemento asfáltico) y los agregados debido a la presencia de agua, es un problema de gran importancia para las mezclas asfálticas calientes. Entre mejor sea revestido el agregado por el bitumen, mayor será la resistencia al agua o impermeabilización de la mezcla asfáltica. Cuando el agua entra en la mezcla asfáltica comienza un proceso de eliminación del bitumen (cemento asfáltico), provocando la separación de los agregados y la aparición de baches y fallas por fatiga, debido a que los agregados se separan y son arrastrados por los vehículos.

6. ENSAYOS A REALIZAR PARA LA EVALUACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS Y DE LOS MATERIALES UTILIZADOS

El lineamiento se basa directamente de la Norma ASTM D 1559 equivalente a la Norma AASHTO T225. Esta norma detalla el procedimiento de diseño de mezclas por el método Marshall y la interpretación de resultados.

6.1. Metodología de Marshall

El objetivo de este método es la determinación del contenido óptimo de bitumen (cemento asfáltico) para una combinación específica de agregados pétreos. El método, además, proporciona datos sobre propiedades que debe poseer la mezcla asfáltica analizada, establece valores de densidad específica bruta y densidad teórica máxima, contenidos óptimos de vacíos requeridos y emplea la evaluación de la prueba de estabilidad-flujo Marshall de una probeta cilíndrica, que deben ser cumplidos durante la realización del diseño de mezcla asfáltica en caliente.

6.2. Densidad específica bruta (Bulk)

También llamada como densidad específica bruta o bulk (Gmb), puede emplearse rápidamente si el espécimen tiene una temperatura fría, este ensayo se emplea con los requisitos de la norma AASHTO T 166-05; esta divisa la densidad específica neta para el agregado pétreo total que compone la mezcla asfáltica. La observación de la relación entre la masa de un volumen dado de material asfáltico y la masa de un volumen igual de agua a una temperatura igual.

El cálculo empieza a partir de la relación que hay entre el peso de la muestra seca al aire y la diferencia entre el peso de la muestra saturada de agua y el peso de la muestra sumergida en el agua a temperatura ambiente. Esta densidad representa la densidad que debe tener la mezcla colocada en campo.

6.3. Densidad específica teórica máxima

La densidad específica teórica máxima (Gmm) es un valor adimensional basado en la Norma ASTM D2041, o su equivalente AASHTO T 209-05, que caracteriza principalmente los factores de la composición de la mezcla asfáltica, como el tipo de mezcla, la cantidad específica de agregados y del bitumen (cemento asfáltico) de una muestra sin compactar a una temperatura ambiente, de preferencia en un rango donde se estime el contenido de bitumen (cemento asfáltico) óptimo de la mezcla.

La principal razón de conocer el valor de la densidad específica teórica máxima, es la determinación del porcentaje de vacíos de aire que tenga la mezcla asfáltica, por medio de una ecuación que involucra este valor, con la densidad específica bruta (bulk).

6.4. Resistencia al flujo plástico de mezclas asfálticas

El ensayo de resistencia al flujo plástico está directamente establecido a medir la resistencia y la deformación de una probeta de un diseño de mezcla asfáltica determinado, los requerimientos están basados en Norma AASHTO T 245-97(2004). La fluencia mide la deformación que produce la carga aplicada en la probeta de mezcla asfáltica.

Este procedimiento se inicia sumergiendo la probeta de mezcla asfáltica en un baño de María a la temperatura especificada en la norma que es $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($140\text{ }^{\circ}\text{F} \pm 1,8\text{ }^{\circ}\text{F}$) tomando un tiempo aproximado de 30 a 40 minutos previo a la prueba de flujo plástico. Se retira la probeta de mezcla asfáltica del baño de María, secando despacio la superficie de la probeta con un trapo. Se coloca y se centra la probeta en la mordaza inferior, lo cual se procede posteriormente para aplicarle carga de prueba a la probeta a una deformación constante de 51 mm (5") por minuto, hasta que ocurra la falla. La lectura de falla está definido por la carga máxima que se obtiene. El número total de carga en Newton (lb) que se requiere para que se determine la falla de la probeta se registrará como el valor de estabilidad Marshall el cual es la resistencia al flujo plástico. Simultáneamente, efectuando el ensayo de estabilidad de flujo plástico, al no tener un equipo de registro automático, se deberá colocar y mantener un medidor de flujo sobre la barra guía y cuando la carga empiece a disminuir se tomará la lectura y registrará como el valor de flujo final. Existe un rango de diferencia entre el valor de flujo final e inicial expresado en unidades de 0,25 mm (1/100 ") el cual será el valor del flujo plástico de Marshall.

6.5. Porcentaje de vacíos (VA)

Representa los espacios pequeños de aire, los cuales están presentes en los agregados cubiertos de bitumen de la mezcla asfáltica final compactada. El estudio que avala este ensayo es la Norma ASTM D 3203 y su equivalente la Norma AASHTO T269, el cual detalla que las mezclas asfálticas contengan un rango de porcentaje de vacíos determinado para permitir una compactación adicional debido a las cargas de los vehículos que pasen en la superficie del pavimento asfáltico, y proporcionar espacios donde el pavimento asfáltico pueda fluir durante esa compactación adicional. Según la norma especificada el porcentaje permitido de vacíos para capas de base y pavimentos asfálticos está

entre un rango de 3 a un 5 por ciento, según el diseño de mezcla asfáltica a utilizar. Este parámetro tiene relación de la durabilidad de un pavimento asfáltico, si este rebasa los parámetros descritos anteriormente del porcentaje de vacíos, no se garantiza el desempeño en campo de resistir efectos causados por los fenómenos de la naturaleza. Otra característica física que está involucrado es la permeabilidad, por la razón de que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla asfáltica. El contenido de vacíos demasiado alto provoca infiltración en el cual entra el agua y el aire, para causar un deterioro continuo en él. Por otra parte, un contenido excesivo muy bajo de porcentaje de vacíos puede producir un fenómeno llamado exudación de asfalto; es una condición en donde el exceso de bitumen (cemento asfáltico) es exprimido fuera de la mezcla asfáltica hacia la superficie y causa el desprendimiento de partículas.

6.6. Granulometría del polímero tereftalato de polietileno (PET)

La granulometría se determina mediante la norma ASTM D422, es un análisis de tamaño de partículas utilizando una batería de tamices, efectuada sobre una muestra de masa del polímero tereftalato de polietileno (PET); el análisis de tamizado o granulometría consiste en pasar la muestra por una serie de batería con diferentes tamaños de tamices especificados en el diseño de granulometría a trabajar. La granulometría del material toma en cuenta el porcentaje (en peso) total de muestra que pasa por cada uno de los tamices, en el cual se reemplazará un porcentaje de material en lugar del tamaño del agregado. La granulometría es determinada al calcular el peso del contenido de cada tamiz, luego se resta el peso del contenido de cada tamiz del peso total de la muestra.

6.7. Gravedad específica del polímero tereftalato de polietileno (PET)

Al igual que un suelo, se debe determinar la gravedad específica del polímero tereftalato de polietileno (PET), el cual está dado por la norma ASTM D854 o su equivalente AASHTO T100, y es la relación que tiene la gravedad específica del material y la gravedad específica del agua destilada y sujeta a la presión de una atmósfera. Este ensayo se determina en laboratorio con la ayuda de dos matraces aforados de 500 centímetros cúbicos cada uno y una balanza. El procedimiento empieza llenando un matraz con agua destilada, se pesa el completamente, luego se vacía el matraz y se introduce una cantidad referente del material seco al matraz, se llena de agua y se agita de manera que salga todos las burbujas de aire que puedan afectar en el peso total del matraz, con material en el agua destilada, teniendo el peso del matraz con agua, el peso del matraz con material y agua, y finalmente teniendo el peso del material referente. Estos datos se introducen a la fórmula específica para obtener la gravedad específica, luego se repite el procedimiento con el otro matraz, para que posteriormente se promedie el resultado obtenido.

6.8. Peso volumétrico del tereftalato de polietileno (PET)

El peso volumétrico está dado por la norma ASTM C-29, es la relación del peso en masa del material entre su volumen que este ocupa, es expresado en kg/m^3 . Para este caso se realizó mediante un beacker pesado, luego se realizó llenando el beacker con tereftalato de polietileno (PET) a una medida estimada, y pesando el beacker con tereftalato de polietileno (PET) incluido, tomando la referencia la relación de peso en masa del material y el volumen ocupado da como resultado $437 \text{ kg}/m^3$, el cual es un valor relativamente alto para la masa en relación al volumen que ocupa el polímero.

6.9. Características que deben cumplir los agregados en las mezclas asfálticas

Los agregados pétreos empleados deben cumplir características específicas para que se puedan utilizar en la realización de un diseño de mezclas asfálticas en caliente, estas deberán de tener características tales que, al aplicarles una capa de bitumen (cemento asfáltico), no se desprenda por los factores del agua y/o del tránsito.

- Agregado grueso: Es el material retenido por el tamiz de 4,75 mm de abertura, debe cumplir con los requisitos establecidos en la Norma ASTM D 692. El agregado tiene que tener procedencia en la trituración de piedra de cantera o de grava natural o por una combinación de ambas. Sus elementos deberán ser limpios, resistentes y durables, sin abundancia de las partículas planas, alargadas, blandas o desintegrables.
- Agregado fino: Es el material que pasa el tamiz de 4,75 mm de abertura. Debe cumplir con los requisitos establecidos en la Norma ASTM D 1073. El agregado tiene que proceder en su totalidad de la trituración de piedra de cantera o de grava natural o parcialmente de fuentes naturales de arena. Los granos del agregado fino tendrán que ser duros, limpios y de superficie rugosa y angular.

6.9.1. Gravedad específica bruta de los agregados

La gravedad específica bruta es la relación entre la masa y contenido en una unidad de volumen de un material, a la masa del mismo volumen de agua a una temperatura indicada. El procedimiento es el siguiente, se determina el porcentaje de masa de cada agregado para la mezcla, se calcula la gravedad

específica bruta de cada uno de los agregados, luego se calcula la gravedad específica bruta para la combinación de cada uno de los agregados.

7. PROCEDIMIENTO DEL MÉTODO MARSHALL

A continuación se detalla los procedimientos llevados a cabo de la metodología de Marshall que describe la norma ASTM D1559, para los ensayos que se realizan a partir de un diseño de mezcla asfáltica en caliente, hasta el análisis de los resultados obtenidos.

7.1. Descripción de diseño de mezcla

Para iniciar el procedimiento del diseño de la mezcla asfáltica por el método Marshall, se debe proponer una graduación de agregados los cuales está detallada en la Norma ASTM D 3515. Esta norma establece los valores límites en que deben estar comprendidas las curvas límites granulométricas de los agregados para la mezcla asfáltica.

Esta norma detalla los valores límites en los que debe estar comprendida la curva granulométrica, tomando un valor de tamaño máximo de agregado. El valor definido se ubica en la siguiente tabla (tabla XVII), para conocer los valores límites y de los porcentajes en masa de los agregados, que deben pasar la serie de batería de tamices propuestos en ella. Luego el criterio del diseñador será tomar los valores de porcentaje que pasa para cada tamiz que desee, para después realizar una curva granulométrica quedando los valores tomados dentro de los límites propuestos en la norma (figura 4), teniendo el diseño propuesto de la mezcla asfáltica.

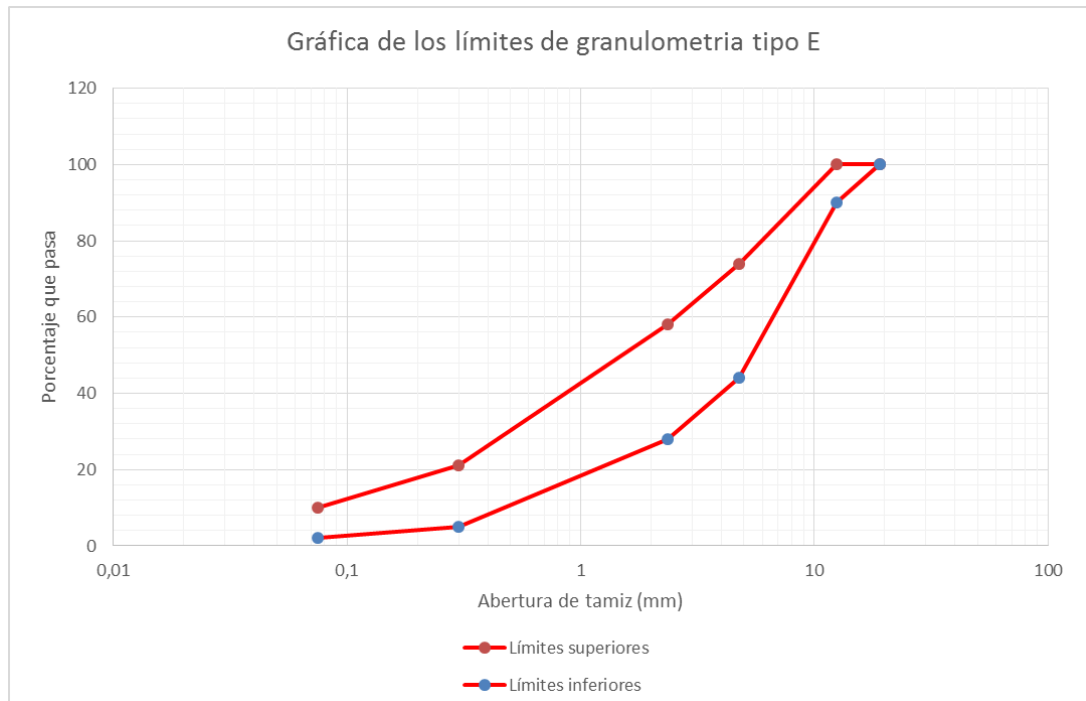
Tabla XVII. **Graduación de los agregados para pavimentos asfálticos (ASTM D3515)**

Tamaño del tamiz	Porcentaje en masa que pasa el tamiz designado (AASHTO T 27 y T 11)					
	Graduación designada y tamaño máximo nominal					
	A (50.8 mm)	B (38.1 mm)	C (25.4 mm)	D (19 mm)	E (12.5 mm)	F (9.5 mm)
	2"	1 ½"	1"	¾"	½"	⅜"
63,00 mm	100					
50,00 mm	90-100	100				
38,10 mm	-	90-100	100			
25,00 mm	60-80	-	90-100	100		
19,00 mm	-	56-80	-	90-100	100	
12,50 mm	35-65	-	56-80	-	90-100	100
9,50 mm	-	-	-	56-80	-	90-100
4,75 mm	17-47	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85
2,36 mm	10-36	15-41	19-45	23-49	28-58	28-58
0,30 mm	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23
0,075 mm	0-5	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10

(1) El tamaño máximo nominal es el tamaño del tamiz mayor siguiente al tamaño del primer tamiz que retenga más del 10 % del agregado combinado. El tamaño máximo es el del tamiz mayor al correspondiente al tamaño máximo nominal.

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. p. 298.

Figura 4. **Gráfica de los límites de graduación de los agregados para una granulometría tipo E**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

7.2. Descripción de la metodología para la elaboración de probetas de mezcla asfáltica

Para la elaboración de probetas de mezcla asfáltica que se detalla en la norma INV E 748 el procedimiento de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall, el equipo a utilizar es el siguiente:

- Un horno.
- Una placa de calefacción.
- Dos termómetros adecuados para la medición de la temperatura de la mezcla asfáltica y los agregados.

- Una balanza para pesar material pétreo y las probetas compactadas.
- Una batería de tamices.
- Un recipiente para mezclar.
- Dos cucharones y dos espátulas.
- Un molde cilíndrico con collar de extensión y placa de base plana, para moldear probetas.
- Un martillo de compactación de operación manual. Consiste en un dispositivo de acero con una base plana circular de compactación con una articulación de resorte y un pisón deslizante de 4,54 kg de masa total, montado en forma que proporcione una altura de caída de $457,2 \pm 1,5$ mm.
- Un pedestal de compactación. Es una pieza prismática de madera de base cuadrada de 203,2 mm de lado y 457,2 mm de altura, provista en su cara superior con una platina cuadrada de acero de 304,8 mm de lado y 25,4 mm de espesor. Esta debe de estar firmemente sujeta al pedestal.
- Un dispositivo con resorte de tensión, diseñado para centrar rigidamente el molde de compactación sobre el pedestal. Debe de sostener en su posición el molde, el collar y la placa de base durante la compactación de la probeta.

Figura 5. **Horno graduado utilizado para calentar los agregados, moldes y el bitumen (cemento asfáltico)**



Fuente: Sección de asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 6. **Equipo utilizado para calentar la mezcla asfáltica**



Fuente: Sección de asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 7. **Guantes, recipiente y espátula para mezclar**



Fuente: Sección de asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería USAC.

Figura 8. **Termómetros adecuados para medir temperatura**



Fuente: Sección de asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC

Figura 9. **Balanza para pesar los materiales**



Fuente: Sección de asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC

Figura 10. **Batería de tamices**



Fuente: Sección de asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 11. **Molde cilíndrico con collar de extensión y placa de base plana para formar las probetas**



Fuente: Sección de asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 12. **Martillo de compactación de operación manual y pedestal para compactación**



Fuente: Sección de asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

7.2.1. Procedimiento para elaboración de probetas de mezcla asfáltica

- Establecida una graduación de los agregados pétreos, se preparará una serie de probetas con distintos contenidos de bitumen (cemento asfáltico), desde un 4 hasta un 6 % (con incrementos de 0,5 % en peso entre ellos) del peso total de la mezcla de agregados. Se prepararán tres probetas para cada contenido de asfalto. Para cada probeta se utilizan 1 050 gramos de mezcla de agregados, tomando un 5 % del polímero tereftalato de polietileno (PET), del peso total de los agregados pétreos para el diseño de mezcla asfáltica con tereftalato de polietileno (PET).
- Secar los agregados y separar por medio de la batería de tamices, en fracciones de diferentes tamaños.
- Calentar el bitumen (cemento asfáltico) en el horno graduado a una temperatura correspondiente para producir una viscosidad cinemática entre 0,15 y 0,19 Pa-s (150 y 190 cS).
- Tomando las bandejas taradas, pesar las cantidades exactas de cada porción de agregados pétreos, previamente calculadas de acuerdo con el diseño de mezcla asfáltica propuesta, para la fabricación de una probeta, añadiendo para el diseño con tereftalato de polietileno (PET) la porción del 5 % del peso total de los agregados. Los pesos de los agregados debe de ser igual a 1 050 gramos.
- Calentar los agregados pétreos hasta llegar a una temperatura aproximada de 110 °C. Con la ayuda de un recipiente de mezclado y una espátula, mezclar en seco durante un tiempo a criterio que permita obtener una buena combinación de los agregados, sin que se presente una pérdida de temperatura en la mezcla.
- Verter la cantidad requerida de bitumen (cemento asfáltico) en la mezcla de agregados.

- Mezclar los agregados con el bitumen (cemento asfáltico) lo más rápido y constante posible hasta obtener una mezcla completa y homogénea. Esta mezcla se debe realizar en una placa de calentamiento hasta que la mezcla alcance una temperatura de 140 °C, aproximadamente.
- Simultáneamente con la preparación de la mezcla, el conjunto de molde, collar y placa de base, se calientan a temperatura de 60 °C.
- Armar el conjunto de moldeo de las probetas, aplicándole previamente aceite para desencofrar.
- Verter la mezcla en el molde y apisonar con una espátula 15 veces alrededor del perímetro interior del molde y 10 sobre el interior de la mezcla asfáltica. Esto se realiza para lograr un mejor acomodo de las partículas de la mezcla en el molde.
- Compactar la mezcla aplicando 75 golpes, por medio del martillo de compactación de operación manual. La temperatura de la mezcla inmediatamente antes de la compactación deberá ser aproximadamente de 140 °C.
- Se procede a retirar el collar, se voltea el molde y se monta de nuevo en el pedestal y se aplica el mismo número de golpes a la cara invertida de la probeta.
- Después de la compactación, se retira el collar junto con los moldes. Se deja enfriar la muestra al aire dentro del molde durante 24 horas después de la compactación, luego se desencofra.

7.3. Descripción de la metodología para obtener la densidad específica bruta (Bulk)

Para la determinación de la densidad específica bruta (bulk) de probetas de mezcla asfáltica que se detalla en la norma INV E 733 y también en la norma ASTM D2726 o su equivalente la norma AASHTO T166 el cual emplea el procedimiento, el equipo a utilizar es el siguiente:

- Una balanza con capacidad adecuada y sensibilidad suficiente para que las densidades se puedan calcular al menos con tres cifras significativas. Deberá estar conformada por un dispositivo de suspensión adecuado, que permita pesar el espécimen dentro del agua, suspendido bajo el centro del platillo de la balanza.
- Un baño con agua para la inmersión del espécimen. Este deberá estar provisto de un rebosadero para mantener el agua a un nivel constante.

Figura 13. **Pileta de agua para la suspensión de probetas**



Fuente: Sección de asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 14. **Balanza provista de dispositivo de suspensión**



Fuente: Sección de asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

7.3.1. **Procedimiento para obtener la densidad específica bruta (Bulk)**

- Se determinará la masa de la probeta de mezcla asfáltica en seco, pesándolo después de que haya permanecido al menos durante 1 hora a temperatura ambiente.
- Se sumerge la probeta de mezcla asfáltica en un baño de agua a temperatura ambiente durante 5 minutos.
- Se extrae y se seca superficialmente la probeta de mezcla asfáltica para posteriormente pesarla y obtener su peso saturado.
- Se sumerge la muestra en un baño de agua a temperatura ambiente, se pesa estando suspendida en el agua.
- Se procede a calcular la gravedad específica de la muestra utilizando la siguiente ecuación:

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

Donde:

G_{mb} = densidad específica bruta

A = Peso Seco del espécimen (g)

B = Peso del espécimen saturado con superficie seca (g)

C = Peso del espécimen sumergido (g)

7.4. Descripción de la metodología para obtener la densidad teórica máxima

Para la determinación de la densidad teórica máxima de probetas de mezcla asfáltica que se detalla en la norma INV E735 y también en la norma ASTM D2041 o su equivalente, la norma AASHTO T209. El equipo a utilizar es el siguiente:

- Un picnómetro de vacíos, de metal o plástico con un diámetro de 180 a 260 mm y una altura no menor de 160 mm. Este debe estar equipado con una tapa transparente, asegurada con un empaque de caucho y con una conexión para la aplicación del vacío.
- Una balanza con capacidad adecuada y sensibilidad suficiente, para que las densidades específicas de las muestras se puedan calcular al menos con cuatro cifras significativas.
- Una bomba de vacío, capaz de evacuar el aire del recipiente de vacío hasta una presión residual de 25 psi.

- Un manómetro de presión residual, para confirmar que se está aplicando la presión al recipiente, debe ser capaz de medir una presión residual de 25 psi o menos.
- Una válvula de purga, para facilitar un ajuste del vacío que está siendo aplicado al recipiente y la liberación lenta de la presión de vacío.
- Un dispositivo de agitación mecánica, capaz de aplicar una agitación suave pero consistente a la muestra.

Figura 15. **Picnómetro de vacíos**



Fuente: Sección de asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 16. **Bomba de vacío y manómetro de presión residual**



(a) Bomba de Vacios.

(b) Manometro de presion residual

Fuente: Sección de asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

7.4.1. Procedimiento para obtener la densidad teórica máxima

- Se toma la muestra seca, se desintegra con las manos logrando separar sus partículas, teniendo cuidado de no fracturarlas. Las partículas de la porción del agregado fino no deben de ser mayores de 6 mm.
- Verter la muestra directamente en el picnómetro previamente tarado. Se pesa el recipiente con la muestra y se designa la peso neta (únicamente el peso de la muestra).
- Se agrega agua a temperatura ambiente, suficiente para cubrir la muestra por completo. Se recomienda que el espejo de agua esté a una altura de por lo menos 1" por encima de la mezcla.
- Se colocar el picnómetro con la muestra y agua sobre el dispositivo de agitación mecánica y asegurando la superficie. Se activa la bomba de vacío, para poner en marcha la agitación e inmediatamente, por medio de

la válvula de presión residual, se reduce que la presión de vacío se encuentre dentro de un rango de 25 a 30 psi. La presión de vacío se deberá alcanzar en un tiempo no mayor a 1 minuto y una vez alcanzado, se continuará el vacío y la agitación durante 15 minutos.

- Después de que pase un tiempo de 15 minutos, se libera gradualmente la presión de vacío usando una válvula de purga.
- Se llena lentamente el picnómetro con agua, teniendo el cuidado de no introducir aire dentro de la muestra de mezcla asfáltica. Se seca cualquier humedad presente en el exterior del matraz y de la placa de vidrio. Se determina el peso del picnómetro más la placa, junto la muestra y el agua.
- Se calcula la densidad específica teórica máxima por medio de la siguiente expresión:

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

Donde:

G_{mm} = densidad específica teórica máxima

A = masa de la muestra seca (g)

D = masa del picnómetro lleno de agua (g)

E = masa del picnómetro con la muestra y agua (g)

7.5. Descripción de la metodología de porcentaje de vacíos

Para la determinación del porcentaje de vacíos de aire que contiene la mezcla asfáltica que se detalla en la norma INV E736 y también en la norma ASTM D3203 o su equivalente la norma AASHTO T269 el cual emplea un procedimiento con los datos obtenidos anteriormente que se detalla a continuación:

7.5.1. Procedimiento para obtener el porcentaje de vacíos

- Se determina la densidad específica bulk de la mezcla asfáltica compactada, por medio del procedimiento descrito anteriormente.
- Se determina la densidad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica suelta, por medio del procedimiento descrito anteriormente.
- Se calcula el porcentaje de vacíos con aire en la mezcla asfáltica, por medio de la siguiente ecuación:

$$V_A = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \times 100$$

Donde:

V_A = porcentaje de vacíos

G_{mm} = gravedad específica teórica máxima

G_{mb} = gravedad específica bruta

7.6. Descripción de la metodología de la prueba de estabilidad-flujo de Marshall

Para la determinación de la prueba de estabilidad-flujo de Marshall de una probeta de mezcla asfáltica se detalla en la norma INV E748 y también en la norma ASTM D1559 o su equivalente la norma AASHTO T245 la cual emplea un procedimiento con el equipo que se detalla a continuación:

- Mordazas de hierro fundido: La mordaza inferior va montada sobre una base plana, provista de dos varillas perpendiculares a ella que sirven de guía para ensamblarla con la mordaza superior.

- Máquina de compresión para la rotura de las probetas: Se emplea una prensa mecánica o hidráulica, capaz de producir una velocidad uniforme de desplazamiento vertical de 50 ± 5 mm/min.
- Anillo dinamométrico: Para medir la resistencia de la probeta. Irá acoplado a la prensa y debe ser de 20 kN de capacidad nominal con una sensibilidad mínima de 50 N.
- Deformímetro de lectura final fija: Con divisiones de 0,25 mm o de mayor precisión. En el momento del ensayo, el medidor deberá estar apoyado firmemente sobre la mordaza inferior.
- Baño de agua de profundidad: Suficiente para mantener una lámina de agua mínima de 30 mm sobre la superficie superior de las probetas compactadas. Debe tener un control termostático que le permita mantener la temperatura en cualquier punto del tanque.

Figura 17. **Mordazas de hierro**



Fuente: Sección de asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 18. **Máquina de compresión para la rotura de las probetas**



Fuente: Sección de asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 19. **Anillo dinamométrico**



Fuente: Sección de asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 20. **Recipiente de control termostático**



Fuente: Sección de asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

7.6.1. Procedimiento de la prueba de estabilidad-flujo de Marshall

- El ensayo se debe realizar dentro de las siguientes 24 horas a la compactación de las probetas.
- Se colocan las probetas en el baño de agua durante 45 minutos aproximadamente manteniendo una temperatura constante de 60 °C.
- Antes de colocar las probetas, se debe limpiar perfectamente las barras guías y las superficies interiores de las mordazas de ensayo.
- Se retira una probeta del baño de agua y se seca cualquier exceso de agua con una toalla. Se coloca centrada en la mordaza inferior, se monta la mordaza superior con el medidor de deformación y el conjunto se sitúa centrado en la prensa. Colocar el medidor de flujo en posición, se ajusta a

ceros, y se mantiene su vástago firmemente contra la mordaza superior, mientras se aplica la carga de ensayo.

- Se aplica la carga sobre la probeta con la prensa a una deformación constante de 50 ± 5 mm/min hasta que ocurra una falla, es decir, cuando se advierte que se alcanza la máxima carga y luego comienza decaer. El procedimiento completo, desde la extracción de la probeta del baño de agua hasta su falla, no deberá exceder a más de 30 segundos.
- Se anota el valor de carga leído en el anillo dinamométrico y el valor de la deformación leído en el deformímetro.
- Se calcula el equivalente de resistencia en lbf de la carga obtenida, utilizando los valores de la tabla HUMBOLDT MFG. CO. 7300 W. AGATITE AVE. NORRIDGE, IL 60706 (ver anexo 1).
- Al valor de resistencia en lbf se le aplica un factor de corrección, el cual está en función del volumen de la probeta ensayada, para esto se utiliza la tabla de factores de corrección de estabilidad medida (ver anexo 2).

8. DATOS OBTENIDOS Y CÁLCULOS A REALIZAR DE LOS ENSAYOS DEL MÉTODO MARSHALL

En esta sección se presentan los datos obtenidos y los cálculos que se realizaron de cada ensayo descrito en el capítulo anterior:

8.1. Datos de la granulometría del diseño de mezcla

Se realizó una dosificación con los porcentajes de acuerdo a la Norma ASTM D 3515 para una granulometría tipo E, tomado como un diseño normal estándar y otro diseño, adicionando tereftalato de polietileno (PET) que cumple los límites de este tipo de granulometría en las Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos, utilizando un tamaño máximo nominal establecido de la combinación de agregados que es de 1/2 pulgada.

Tabla XVIII. **Dosificación del diseño de granulometría tipo E normal estándar**

Tamiz	Abertura	Porcentaje que pasa	Cantidad de peso para la mezcla en gramos
1"	25	100	0
3/4"	19	100	0
1/2"	12,5	95	52,5
#4	4,75	62	346,5
#8	2,36	50	126
#50	0,3	16	357
#200	0,075	8	84

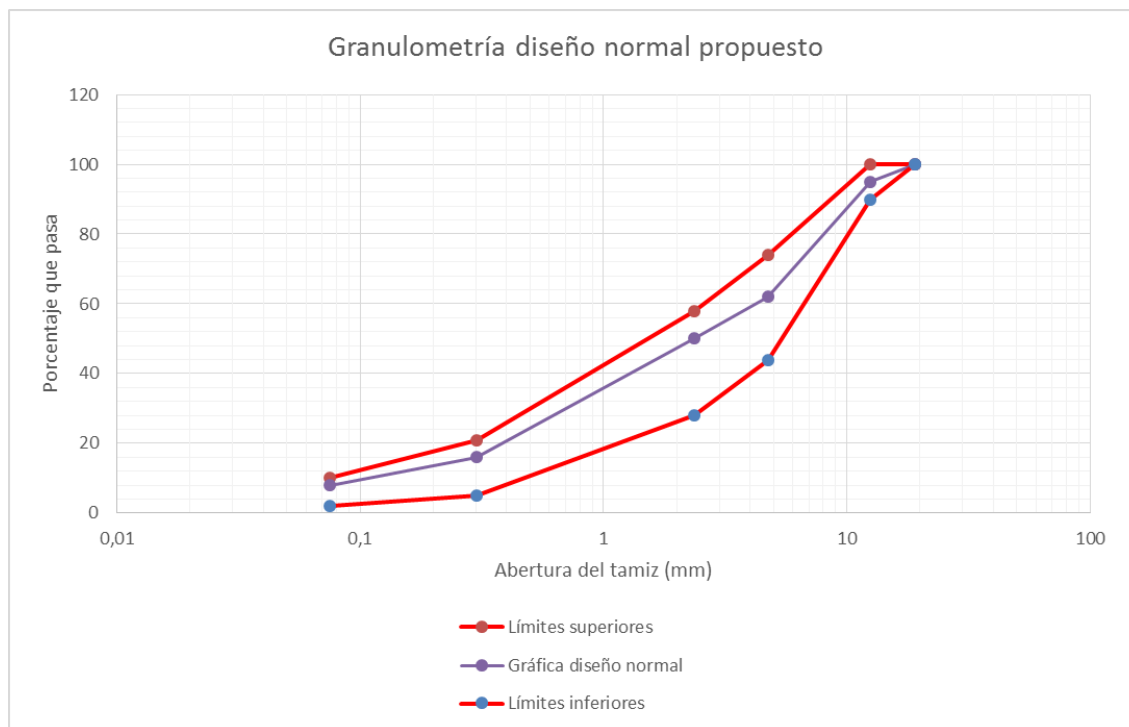
Continuación de la tabla XI.

Fondo	**	**	84
	Total		1 050

Fuente: elaboración propia.

Teniendo un porcentaje de finos en un 16 % para el diseño propuesto normal estándar.

Figura 21. **Gráfica de la curva granulométrica del diseño propuesto normal estándar**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

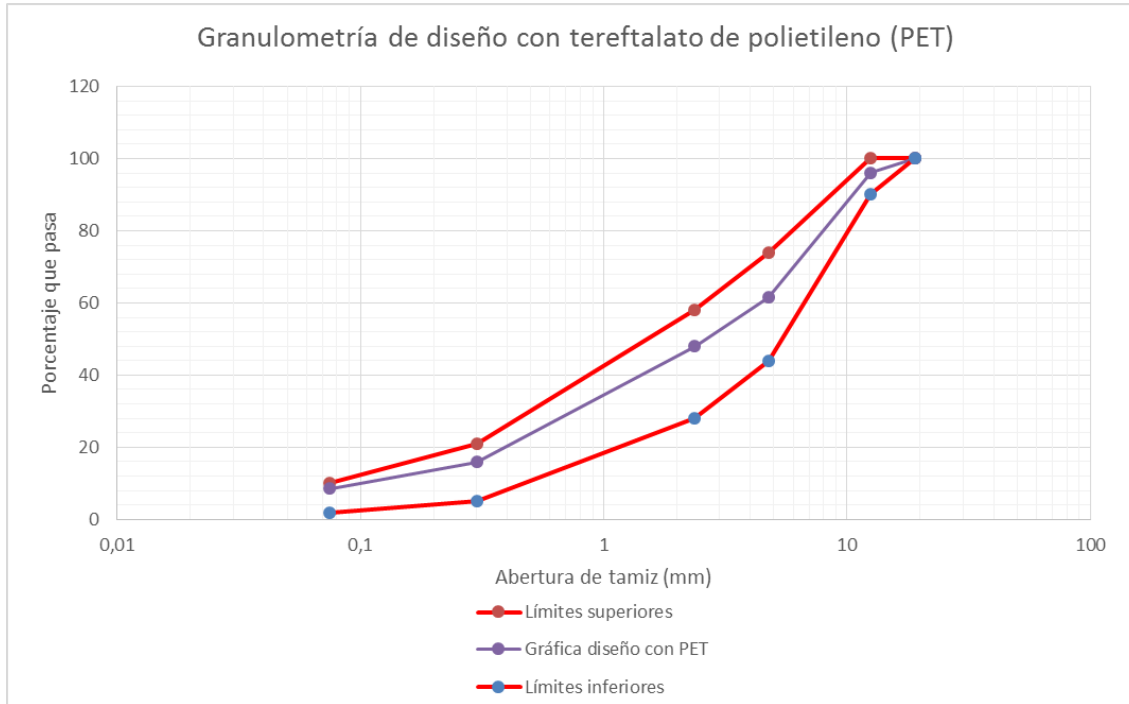
Tabla XIX. **Dosificación del diseño de granulometría tipo E con tereftalato de polietileno (PET)**

Tamiz	Abertura	Porcentaje que pasa	Cantidad de peso para la mezcla en gramos	
			PET	Agregados
1"	25	100	0	0
3/4"	19	100	0	0
1/2"	12,5	96,10	0	52,5
#4	4,75	61,46	20,5	326
#8	2,36	47,99	25	101
#50	0,3	15,92	7	350
#200	0,075	8,61	0	84
Fondo	**	**	0	84
Total			1 050	

Fuente: elaboración propia.

Teniendo un porcentaje de finos en un 16 % para el diseño propuesto normal estándar.

Figura 22. **Gráfica de la curva granulométrica del diseño propuesto con tereftalato de polietileno (PET)**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

8.2. Datos y resultados del ensayo de densidad específica bruta (Bulk)

Se presentan los datos obtenidos del ensayo de densidad específica bruta (Bulk) que detalla la norma ASTM D2726 o su equivalente la norma AASHTO T166 para diseño propuesto normal y diseño adicionando el polímero tereftalato de polietileno (PET):

Tabla XX. **Datos de densidad específica bruta (Bulk) para el diseño propuesto normal**

Datos del diseño propuesto normal para densidad específica bruta (bulk)					
1ra. Pastilla 4 % en gramos		2da. Pastilla 4 % en gramos		3ra. Pastilla 4 % en gramos	
Peso seco	1 083,58	Peso seco	1 085,5	Peso seco	1 082,75
Peso saturado	1 085,91	Peso saturado	1 086,75	Peso saturado	1 085,03
Peso sumergido	625,4	Peso sumergido	627,57	Peso sumergido	626,92
1ra. Pastilla 4,5 % en gramo		2da. Pastilla 4,5 % en gramos		3ra. Pastilla 4,5 % en gramos	
Peso seco	1 088,54	Peso seco	1 080,55	Peso seco	1 090,86
Peso saturado	1 091,12	Peso saturado	1 081,76	Peso saturado	1 092,88
Peso sumergido	630,57	Peso sumergido	628,72	Peso sumergido	630,41
1ra. Pastilla 5 % en gramos		2da. Pastilla 5 % en gramos		3ra. Pastilla 5 % en gramos	
Peso seco	1 095,82	Peso seco	1 095,39	Peso seco	1 094,72
Peso saturado	1 096,87	Peso saturado	1 096,58	Peso saturado	1 096,18
Peso sumergido	640,81	Peso sumergido	637,58	Peso sumergido	640,03
1ra. Pastilla 5,5 % en gramo		2da. Pastilla 5,5 % en gramos		3ra. Pastilla 5,5 % en gramos	
Peso seco	1 094,25	Peso seco	1 096,36	Peso seco	1 100,95
Peso saturado	1 095,38	Peso saturado	1 097,5	Peso saturado	1 102,01
Peso sumergido	636,78	Peso sumergido	638,82	Peso sumergido	642,41
1ra. Pastilla 6 % en gramos		2da. Pastilla 6 % en gramos		3ra. Pastilla 6 % en gramos	
Peso seco	1 092,45	Peso seco	1 100,82	Peso seco	1 110,37
Peso saturado	1 093,18	Peso saturado	1 101,71	Peso saturado	1 111,1
Peso sumergido	642,02	Peso sumergido	644,67	Peso sumergido	648,48

Nota: Los porcentajes colocados en la tabla, equivalen a una proporción calculada de bitumen (cemento asfáltico) en aumento con respecto al peso total establecido en 1 050 gramos de los materiales pétreos de una probeta.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Datos de densidad específica bruta (Bulk) para el diseño con polímero tereftalato de polietileno (PET)**

Datos del diseño con tereftalato de polietileno (PET) para densidad específica bruta (bulk)					
1ra. Pastilla 4 % en gramos		2da. Pastilla 4 % en gramos		3ra. Pastilla 4 % en gramos	
Peso seco	1 057,65	Peso seco	1 075,05	Peso seco	1 080,76
Peso saturado	1 068,68	Peso saturado	1 079,52	Peso saturado	1 090,95
Peso sumergido	568,55	Peso sumergido	582,91	Peso sumergido	577,97
1ra. Pastilla 4,5 % en gramos		2da. Pastilla 4,5 % en gramos		3ra. Pastilla 4,5 % en gramo	
Peso seco	1 091,68	Peso seco	1 075,05	Peso seco	1 080,76
Peso saturado	1 099,09	Peso saturado	1 079,52	Peso saturado	1 090,95
Peso sumergido	593,18	Peso sumergido	582,91	Peso sumergido	577,97
1ra. Pastilla 5 % en gramos		2da. Pastilla 5 % en gramos		3ra. Pastilla 5 % en gramos	
Peso seco	1 093,65	Peso seco	1 097,2	Peso seco	1 080,29
Peso saturado	1 098,3	Peso saturado	1 106,03	Peso saturado	1 084,86
Peso sumergido	601,18	Peso sumergido	598,58	Peso sumergido	592,25
1ra. Pastilla 5,5 % en gramos		2da. Pastilla 5,5 % en gramos		3ra. Pastilla 5,5 % en gramo	
Peso seco	1 096,87	Peso seco	1 102,73	Peso seco	1 096,9
Peso saturado	1 099,74	Peso saturado	1 107,05	Peso saturado	1 101,77
Peso sumergido	607,96	Peso sumergido	606,38	Peso sumergido	601,07
1ra. Pastilla 6 % en gramos		2da. Pastilla 6 % en gramos		3ra. Pastilla 6 % en gramos	
Peso seco	1 106,09	Peso seco	1 101,2	Peso seco	1 097,66
Peso saturado	1 108,26	Peso saturado	1 103,8	Peso saturado	1 100,85
Peso sumergido	612,72	Peso sumergido	610,07	Peso sumergido	605,1

Nota: Los porcentajes colocados en la tabla, equivalen a una proporción calculada de bitumen (cemento asfáltico) en aumento con respecto al peso total establecido en 1 050 gramos de los materiales pétreos de una probeta.

Fuente: elaboración propia.

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo para demostrar la determinación de la densidad específica bruta (bulk):

Datos:

A: 1 050,00 gramos

B: 1 068,68 gramos

C: 568,55 gramos

$$G_{mb} = \frac{1\ 050,00}{1\ 068,68 - 568,55} = 2,099$$

A continuación se presentan los resultados obtenidos del ensayo de densidad específica bruta (bulk) que detalla la norma ASTM D2726 o su equivalente la norma AASHTO T166 para diseño propuesto normal y diseño adicionando el polímero tereftalato de polietileno (PET):

Tabla XXII. **Resultados del ensayo de densidad específica bruta (Bulk) para diseño propuesto normal**

Resultados del diseño propuesto normal para densidad específica bruta (bulk)					
1ra. Pastilla 4 %		2da. Pastilla 4 %		3ra. Pastilla 4 %	
Gmb	2,280	Gmb	2,287	Gmb	2,292
Promedio					2,286

1ra. Pastilla 4,5 %		2da. Pastilla 4,5 %		3ra. Pastilla 4,5 %	
Gmb	2,280	Gmb	2,318	Gmb	2,270
Promedio					2,289

1ra. Pastilla 5 %		2da. Pastilla 5 %		3ra. Pastilla 5 %	
Gmb	2,302	Gmb	2,288	Gmb	2,302
Promedio					2,297

Continuación de la tabla XXII.

1ra. Pastilla 5.5 %		2da. Pastilla 5.5 %		3ra. Pastilla 5.5 %	
Gmb	2,290	Gmb	2,289	Gmb	2,285
Promedio					2,288

1ra. Pastilla 6 %		2da. Pastilla 6 %		3ra. Pastilla 6 %	
Gmb	2,327	Gmb	2,297	Gmb	2,270
Promedio					2,298

Nota: Los porcentajes colocados en la tabla, equivalen a una proporción calculada de bitumen (cemento asfáltico) en aumento con respecto al peso total establecido en 1 050 gramos de los materiales pétreos de una probeta.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. Resultados del ensayo de densidad específica bruta (Bulk) para el diseño con tereftalato de polietileno (PET)

Resultados del diseño con tereftalato de polietileno (PET) para densidad específica bruta (bulk)					
1ra. Pastilla 4 %		2da. Pastilla 4 %		3ra. Pastilla 4 %	
Gmb	2,099	Gmb	2,114	Gmb	2,047
Promedio					2,087

1ra. Pastilla 4,5 %		2da. Pastilla 4,5 %		3ra. Pastilla 4,5 %	
Gmb	2,075	Gmb	2,114	Gmb	2,047
Promedio					2,079

1ra. Pastilla 5 %		2da. Pastilla 5 %		3ra. Pastilla 5 %	
Gmb	2,112	Gmb	2,069	Gmb	2,132
Promedio					2,104

Continuación de la tabla XXIII.

1ra. Pastilla 5.5 %		2da. Pastilla 5.5 %		3ra. Pastilla 5.5 %	
Gmb	2,135	Gmb	2,097	Gmb	2,097
Promedio					2,110

1ra. Pastilla 6 %		2da. Pastilla 6 %		3ra. Pastilla 6 %	
Gmb	2,119	Gmb	2,127	Gmb	2,118
Promedio					2,121

Nota: Los porcentajes colocados en la tabla, equivalen a una proporción calculada de bitumen (cemento asfáltico) en aumento con respecto al peso total establecido en 1 050 gramos de los materiales pétreos de una probeta.

Fuente: elaboración propia.

8.3. Datos y resultados de la densidad específica máxima teórica

Se presentan los datos obtenidos del ensayo de densidad específica teórica máxima dada por la norma ASTM D2041 o su equivalente la norma AASHTO T209, para el diseño propuesto normal y el diseño con tereftalato de polietileno (PET):

Tabla XXIV. **Datos de densidad específica teórica máxima de diseño propuesto normal**

Datos del diseño propuesto normal para la densidad específica teórica máxima	
Pastilla del 4 %	
Picnómetro + Agua	7 381,10 gramos
Peso Tara + Material	1 292,10 gramos
Picnómetro + Mat + Agua	8 015,10 gramos
Peso Tara	240,10 gramos
Pastilla del 4,5 %	
Picnómetro + Agua	7 381,60 gramos
Peso Tara + Material	1 312,10 gramos
Picnómetro + Mat + Agua	8 022,90 gramos
Peso Tara	239,10 gramos
Pastilla del 5 %	
Picnómetro + Agua	7 382,10 gramos
Peso Tara + Material	1 299,70 gramos
Picnómetro + Mat + Agua	8 011,20 gramos
Peso Tara	239,20 gramos
Pastilla del 5,5 %	
Picnómetro + Agua	7 390,03 gramos
Peso Tara + Material	1 314,10 gramos
Picnómetro + Mat + Agua	8 020,10 gramos
Peso Tara	241,10 gramos
Pastilla del 6 %	
Picnómetro + Agua	7 397,98 gramos
Peso Tara + Material	1 332,10 gramos
Picnómetro + Mat + Agua	8 030,30 gramos
Peso Tara	239,10 gramos

Nota: Los porcentajes colocados en la tabla, equivalen a una proporción calculada de bitumen (cemento asfáltico) en aumento con respecto al peso total establecido en 1 050 gramos de los materiales pétreos de una probeta.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Datos de densidad específica teórica máxima del diseño con tereftalato de polietileno (PET)**

Datos del diseño con tereftalato de polietileno (PET) para la densidad específica teórica máxima	
Pastilla del 4 %	
Picnómetro + Agua	7 379,70 gramos
Peso Tara + Material	1 329,10 gramos
Picnómetro + Mat + Agua	8 004,70 gramos
Peso Tara	252,10 gramos
Pastilla del 4,5 %	
Picnómetro + Agua	7 377,00 gramos
Peso Tara + Material	1 338,00 gramos
Picnómetro + Mat + Agua	8 010,50 gramos
Peso Tara	250,50 gramos
Pastilla del 5 %	
Picnómetro + Agua	7 382,00 gramos
Peso Tara + Material	1 329,00 gramos
Picnómetro + Mat + Agua	8 001,10 gramos
Peso Tara	252,20 gramos
Pastilla del 5,5 %	
Picnómetro + Agua	7 379,10 gramos
Peso Tara + Material	1 329,10 gramos
Picnómetro + Mat + Agua	8 004,10 gramos
Peso Tara	239,10 gramos
Pastilla del 6 %	
Picnómetro + Agua	7 383,10 gramos
Peso Tara + Material	1 319,10 gramos
Picnómetro + Mat + Agua	7 997,10 gramos
Peso Tara	239,10 gramos

Nota: Los porcentajes colocados en la tabla, equivalen a una proporción calculada de bitumen (cemento asfáltico) en aumento con respecto al peso total establecido en 1 050 gramos de los materiales pétreos de una probeta.

Fuente: elaboración propia.

Se presenta un ejemplo de cálculo para demostrar la determinación de la densidad teórica máxima:

Datos:

A: 1 052,00 gramos

D: 7 831,10 gramos

E: 8 015,10 gramos

$$G_{mm} = \frac{1\,052,00}{1\,052,00 + 7\,831,10 - 8\,015,10} = 2,517$$

A continuación se presentan los resultados obtenidos del ensayo de densidad específica teórica máxima dada por la norma ASTM D2041 o su equivalente la norma AASHTO T209, para el diseño propuesto normal y el diseño con tereftalato de polietileno (PET):

Tabla XXVI. **Resultados del ensayo de densidad teórica máxima para el diseño propuesto normal**

Resultados del diseño propuesto normal para la densidad teórica máxima			
Pastilla del 4 %		Pastilla del 4,5 %	
Gmm	2,517	Gmm	2,486
Pastilla del 5 %		Pastilla del 5,5 %	
Gmm	2,458	Gmm	2,412
Pastilla del 6 %			
Gmm	2,373		

Nota: Los porcentajes colocados en la tabla, equivalen a una proporción calculada de bitumen (cemento asfáltico) en aumento con respecto al peso total establecido en 1 050 gramos de los materiales pétreos de una probeta.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. Resultados del ensayo de densidad teórica máxima para el diseño con tereftalato de polietileno (PET)

Resultados del diseño con tereftalato de polietileno (PET) para la densidad teórica máxima			
Pastilla del 4 %		Pastilla del 4,5 %	
Gmm	2,383	Gmm	2,395

Pastilla del 5 %		Pastilla del 5,5 %	
Gmm	2,353	Gmm	2,344

Pastilla del 6 %	
Gmm	2,318

Nota: Los porcentajes colocados en la tabla, equivalen a una proporción calculada de bitumen (cemento asfáltico) en aumento con respecto al peso total establecido en 1 050 gramos de los materiales pétreos de una probeta.

Fuente: elaboración propia.

8.4. Datos y resultados de la gravedad específica del polímero tereftalato de polietileno (PET)

Se presentan los datos obtenidos del ensayo de gravedad específica del material tereftalato de polietileno (PET).

Tabla XXVIII. **Datos y resultados de gravedad específica del polímero tereftalato de polietileno (PET)**

Gravedad específica del polímero tereftalato de polietileno (PET)		
	A	B
Capacidad del matraz	500 cm ³	500 cm ³
Peso matraz limpio y seco.....W _m	174,27 gr	170,98 gr
Peso matraz + material seco.....W _{ms}	244,91 gr	242,15 gr
Peso material seco.....W _s	70,75 gr	71,22 gr
Peso matraz + suelo + agua.....W _{msw}	687,11 gr	683,71 gr
Peso matraz + agua.....W _{mw}	671,79 gr	668,15 gr
Temperatura del agua.....T	76 °F = 24,44 °C	75 °F = 23,88 °C
$G_s = \frac{W_s}{W_{mw} + W_s - W_{msw}}$	1,2763	1,2793
Promedio	1,2778	

Fuente: elaboración propia.

8.5. **Cálculo y resultados de la gravedad específica bruta de los agregados**

Se presenta un ejemplo de cálculo para el ensayo de gravedad específica bruta de los agregados combinados:

Datos:

P grueso = 43 %

P fino = 57 %

G grueso = 2,62

G fino = 2,59

$$G_{sb} = \frac{43 + 57}{\frac{43}{2,62} + \frac{57}{2,59}} = 2,60$$

Teniendo como resultado en valor de 2,60 en el cálculo de la gravedad específica bruta de los agregados.

8.6. Cálculo y resultados del porcentaje de vacíos

Se presenta un ejemplo de los cálculos del ensayo de porcentaje de vacíos para diseño propuesto normal y diseño con tereftalato de polietileno (PET):

Datos:

$$G_{mb} = 2,286$$

$$G_{mm} = 2,557$$

$$V_A = \frac{2,557 - 2,286}{2,557} \times 100 = 10,598 \%$$

Tabla XXIX. **Resultados de porcentaje de vacíos del diseño propuesto normal**

Probeta del 4%		Peso total de pastilla 1 050 gramos	Va % 10,598
Pastilla No. 3			
Promedio Gmm	2,557		
Promedio Gmb	2,286		
Probeta de 4,5 %		Peso total de pastilla 1 050 gramos	Va % 7,924
Pastilla No. 3			
Promedio Gmm	2,486		
Promedio Gmb	2,289		
Probeta del 5%		Peso total de pastilla 1 050 gramos	Va % 6,550
Pastilla No. 3			
Promedio Gmm	2,458		
Promedio Gmb	2,297		
Probeta de 5,5%		Peso total de pastilla 1 050 gramos	Va % 5,141
Pastilla No. 3			
Promedio Gmm	2,412		
Promedio Gmb	2,288		

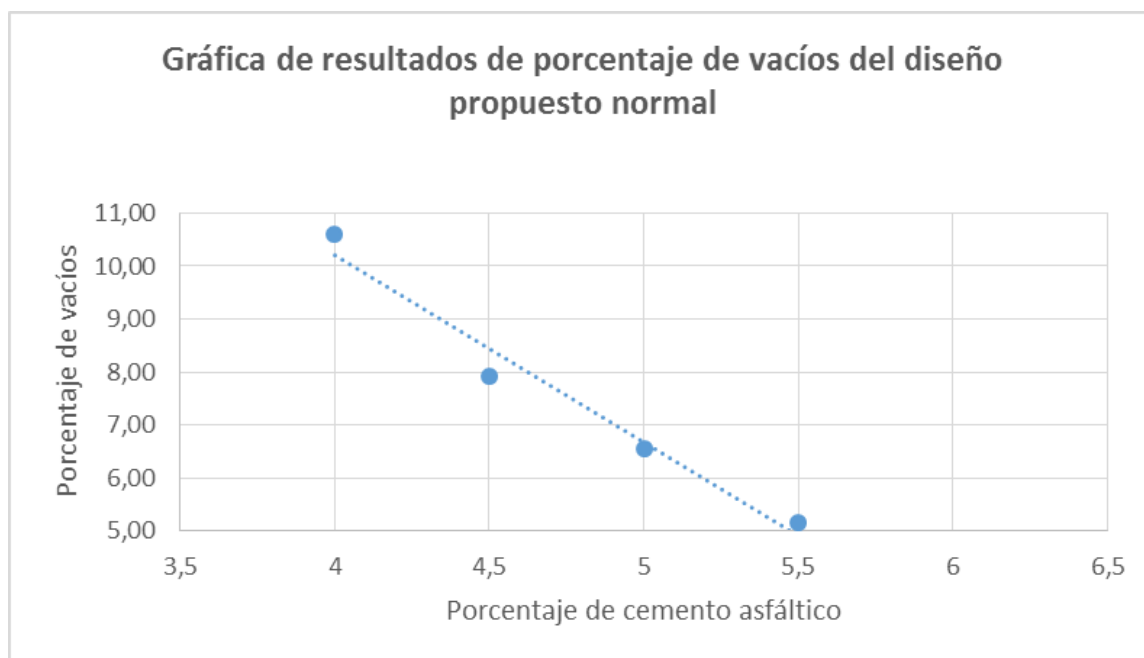
Continuación de tabla XXIX.

Probeta del 6%		Peso total de pastilla	Va %
Pastilla No. 3			
Promedio Gmm	2,373	1 050 gramos	3,161
Promedio Gmb	2,298		

Nota: Los porcentajes colocados en la tabla, equivalen a una proporción calculada de bitumen (cemento asfáltico) en aumento con respecto al peso total establecido en 1 050 gramos de los materiales pétreos de una probeta.

Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Gráfica de resultados de porcentaje de vacíos-densidad del diseño propuesto normal**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

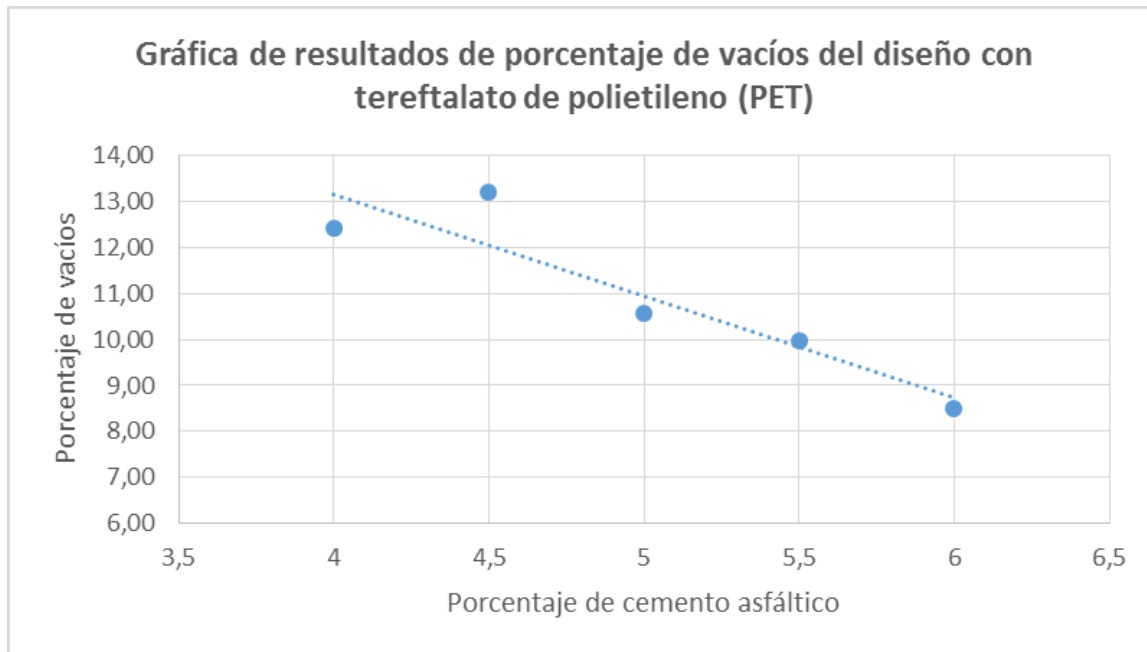
Tabla XXX. **Resultados de porcentaje de vacíos del diseño con tereftalato de polietileno (PET)**

Probeta del 4%		Peso total de pastilla 1 050 gramos	Va % 12,421
Pastilla No. 3			
Promedio Gmm	2,383		
Promedio Gmb	2,087		
Probeta de 4,5 %		Peso total de pastilla 1 050 gramos	Va % 13,194
Pastilla No. 3			
Promedio Gmm	2,395		
Promedio Gmb	2,079		
Probeta del 5%		Peso total de pastilla 1 050 gramos	Va % 10,582
Pastilla No. 3			
Promedio Gmm	2,353		
Promedio Gmb	2,104		
Probeta del 5,5%		Peso total de pastilla 1 050 gramos	Va % 9,983
Pastilla No. 3			
Promedio Gmm	2,344		
Promedio Gmb	2,11		
Probeta del 6%		Peso total de pastilla 1 050 gramos	Va % 8,499
Pastilla No. 3			
Promedio Gmm	2,318		
Promedio Gmb	2,121		

Nota: Los porcentajes colocados en la tabla, equivalen a una proporción calculada de bitumen (cemento asfáltico) en aumento con respecto al peso total establecido en 1 050 gramos de los materiales pétreos de una probeta.

Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Gráfica de resultados de porcentaje de vacíos-densidad del diseño con tereftalato de polietileno (PET)**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

8.7. Resultados de la prueba estabilidad-flujo de Marshall

Se presenta los resultados obtenidos del ensayo de prueba de estabilidad-flujo de Marshall que está dada por la norma ASTM D1559 o su equivalente la norma AASHTO T245, para el diseño propuesto normal y el diseño con tereftalato de polietileno (PET).

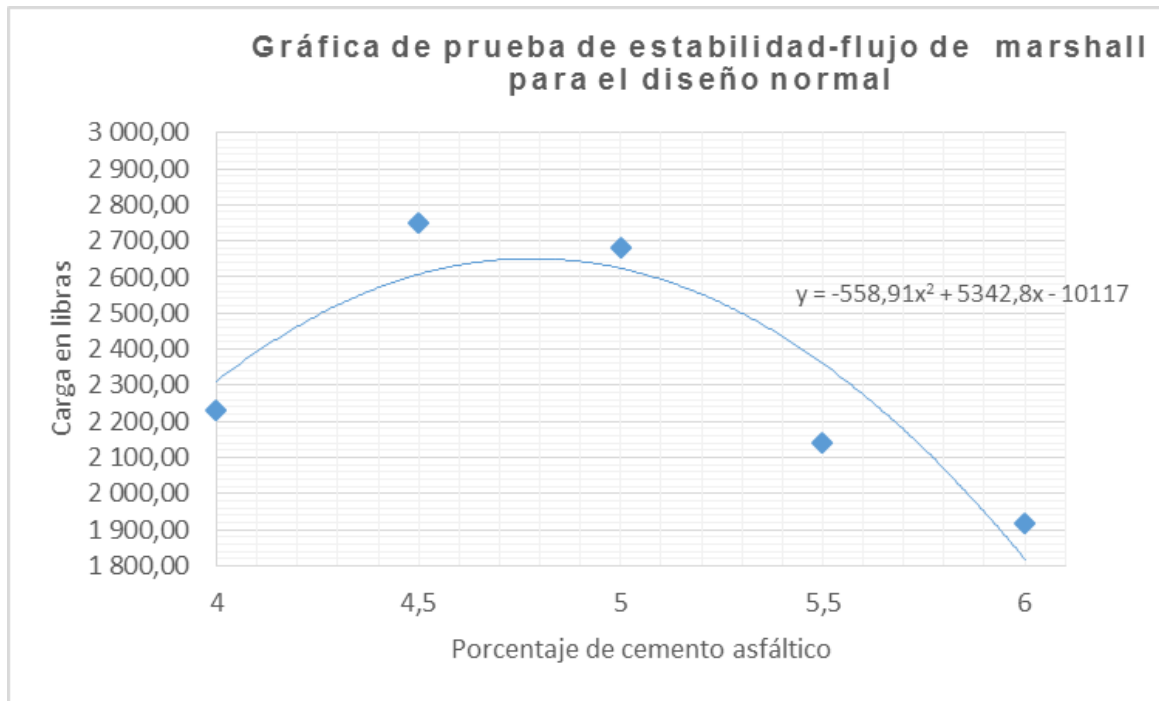
Tabla XXXI. **Resultados de la prueba estabilidad-flujo de Marshall del diseño propuesto normal**

Resultados de estabilidad-flujo de Marshall para diseño propuesto normal						
1ra. Pastilla 4 %		2da. Pastilla 4 %		3ra. Pastilla 4 %		Prom. 4 %
Lectura dada	208,00	Lectura dada	195,00	Lectura dada	189,50	2 231,25 libras
Carga en lb	1 975,00	Carga en lb	1 850,00	Carga en lb	1 800,00	
Deformación	6,00	Deformación	5,00	Deformación	5,00	
Corrección	2 350,25	Corrección	2 201,50	Corrección	2 142,00	
1ra. Pastilla 4,5 %		2da. Pastilla 4,5 %		3ra. Pastilla 4,5 %		Prom. 4,5 %
Lectura dada	231,00	Lectura dada	287,00	Lectura dada	198,00	2 748,33 libras
Carga en lb	2 191,46	Carga en lb	2 719,90	Carga en lb	1 880,06	
Deformación	5,00	Deformación	5,00	Deformación	5,00	
Corrección	2 607,84	Corrección	3 399,88	Corrección	2 237,27	
1ra. Pastilla 5 %		2da. Pastilla 5 %		3ra. Pastilla 5 %		Prom. 5 %
Lectura dada	242,00	Lectura dada	197,00	Lectura dada	249,00	2 682,01 libras
Carga en lb	2 295,26	Carga en lb	1 869,93	Carga en lb	2 361,38	
Deformación	6,00	Deformación	8,00	Deformación	6,00	
Corrección	2 869,08	Corrección	2 225,22	Corrección	2 951,73	
1ra. Pastilla 5,5 %		2da. Pastilla 5,5 %		3ra. Pastilla 5,5 %		Prom. 5,5 %
Lectura dada	189,00	Lectura dada	190,00	Lectura dada	190,00	2 142,75 libras
Carga en lb	1 794,30	Carga en lb	1 803,79	Carga en lb	1 803,79	
Deformación	10,00	Deformación	8,00	Deformación	9,00	
Corrección	2 135,22	Corrección	2 146,51	Corrección	2 146,51	
1ra. Pastilla 6 %		2da. Pastilla 6 %		3ra. Pastilla 6 %		Prom. 6 %
Lectura dada	189,00	Lectura dada	186,00	Lectura dada	181,00	1 918,19 libras
Carga en lb	1 794,30	Carga en lb	1 766,14	Carga en lb	1 718,99	
Deformación	12,00	Deformación	8,00	Deformación	8,00	
Corrección	1 955,79	Corrección	1 925,09	Corrección	1 873,70	

Nota: Los porcentajes colocados en la tabla, equivalen a una proporción calculada de bitumen (cemento asfáltico) en aumento con respecto al peso total establecido en 1 050 gramos de los materiales pétreos de una probeta.

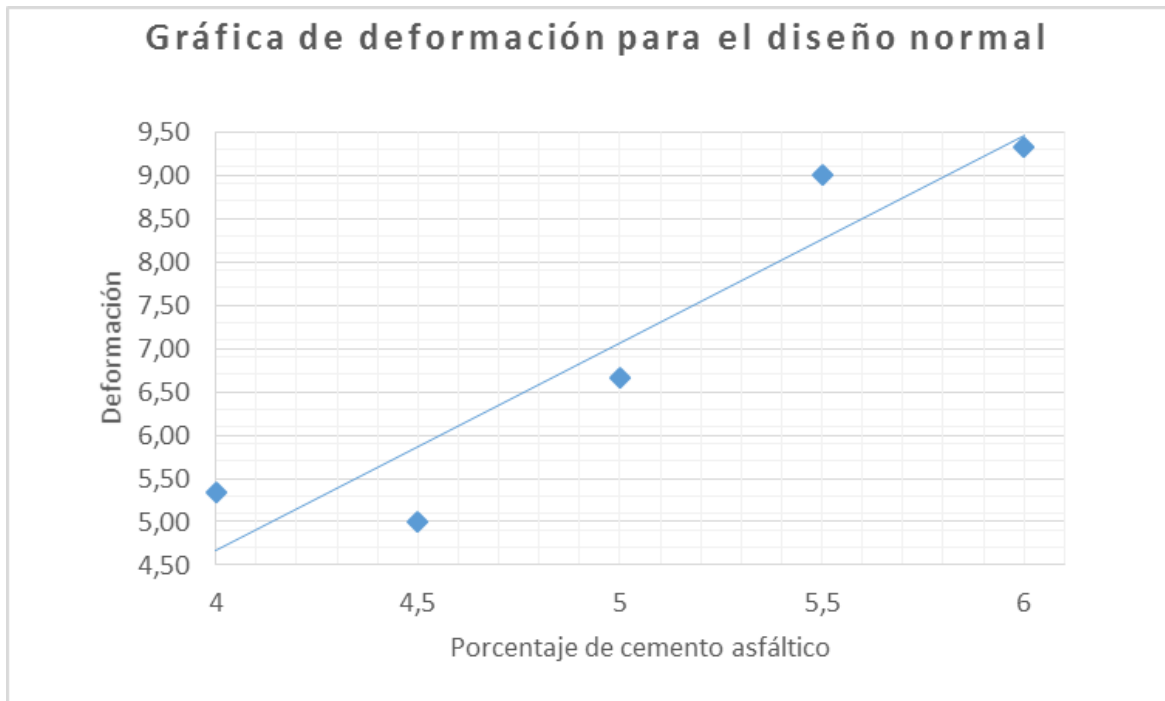
Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Gráfica de resultados de prueba de estabilidad-flujo de Marshall para el diseño propuesto normal**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 26. **Gráfica de resultados de deformación Marshall para el diseño propuesto normal**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XXXII. **Resultados de prueba de estabilidad-flujo de Marshall para el diseño con tereftalato de polietileno (PET)**

Resultados de estabilidad-flujo de Marshall para diseño con tereftalato de polietileno (PET)						
1ra. PASTILLA 4 %		2da. PASTILLA 4 %		3ra. PASTILLA 4 %		Prom. 4 %
Lectura dada	129,00	Lectura dada	152,60	Lectura dada	139,37	1 353,08 libras
Carga en lb	1 226,23	Carga en lb	1 450,00	Carga en lb	1 325,00	
Deformación	14,00	Deformación	14,00	Deformación	15,00	
Corrección	1 226,23	Corrección	1 508,00	Corrección	1 325,00	

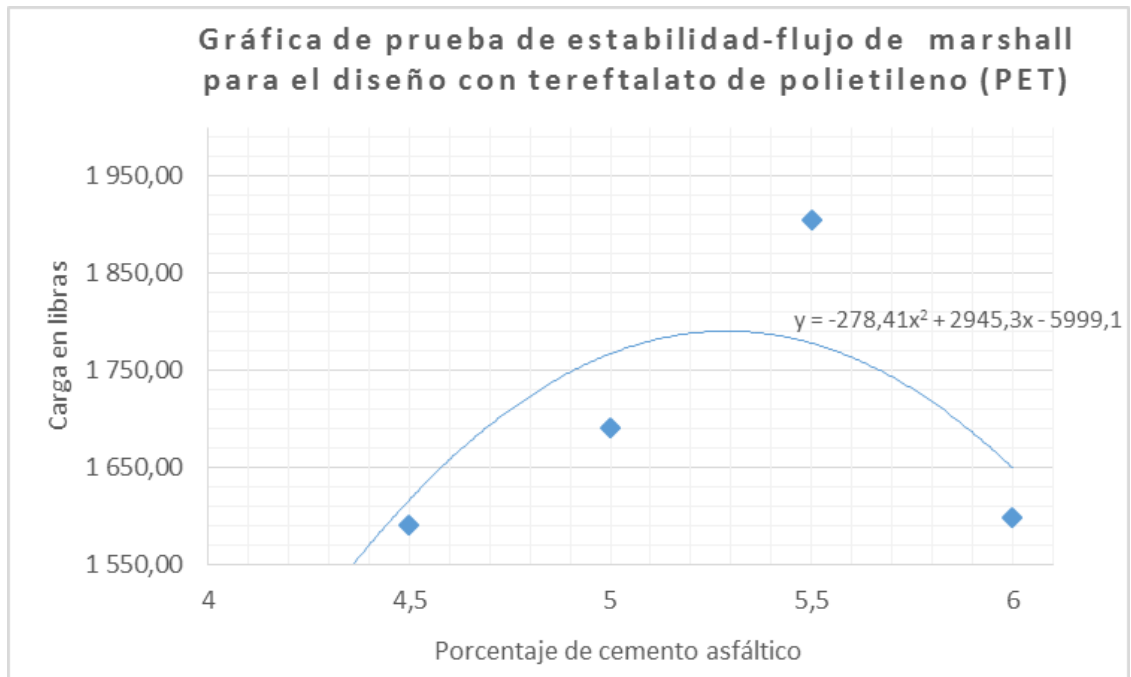
Continuación de tabla XXXII.

1ra. PASTILLA 4,5 %		2da. PASTILLA 4,5 %		3ra. PASTILLA 4,5 %		Prom. 4,5 %
Lectura dada	180,00	Lectura dada	141,00	Lectura dada	168,00	1 590,66 libras
Carga en lb	1 709,49	Carga en lb	1 340,49	Carga en lb	1 600,00	
Deformación	15,00	Deformación	15,00	Deformación	17,00	
Corrección	1 394,11	Corrección	1 394,11	Corrección	1 600,00	
1ra. PASTILLA 5 %		2da. PASTILLA 5 %		3ra. PASTILLA 5 %		Prom. 5 %
Lectura dada	232,00	Lectura dada	135,00	Lectura dada	140,00	1 690,99 libras
Carga en lb	2 200,00	Carga en lb	1 282,89	Carga en lb	1 330,98	
Deformación	18,00	Deformación	15,00	Deformación	14,00	
Corrección	2 288,00	Corrección	1 334,21	Corrección	1 450,77	
1ra. PASTILLA 5,5 %		2da. PASTILLA 5,5 %		3ra. PASTILLA 5,5 %		Prom. 5,5 %
Lectura dada	225,00	Lectura dada	175,00	Lectura dada	168,00	1 905,28 libras
Carga en lb	2 134,82	Carga en lb	1 662,35	Carga en lb	1 596,20	
Deformación	15,00	Deformación	15,00	Deformación	17,00	
Corrección	2 326,95	Corrección	1 728,84	Corrección	1 660,05	
1ra. PASTILLA 6 %		2da. PASTILLA 6 %		3ra. PASTILLA 6 %		Prom. 6 %
Lectura dada	172,00	Lectura dada	188,00	Lectura dada	191,00	1 598,67 libras
Carga en lb	1 525,00	Carga en lb	1 450,00	Carga en lb	1 425,00	
Deformación	18,00	Deformación	19,00	Deformación	15,00	
Corrección	1 662,25	Corrección	1 580,50	Corrección	1 553,25	

Nota: Los porcentajes colocados en la tabla, equivalen a una proporción calculada de bitumen (cemento asfáltico) en aumento con respecto al peso total establecido en 1 050 gramos de los materiales pétreos de una probeta.

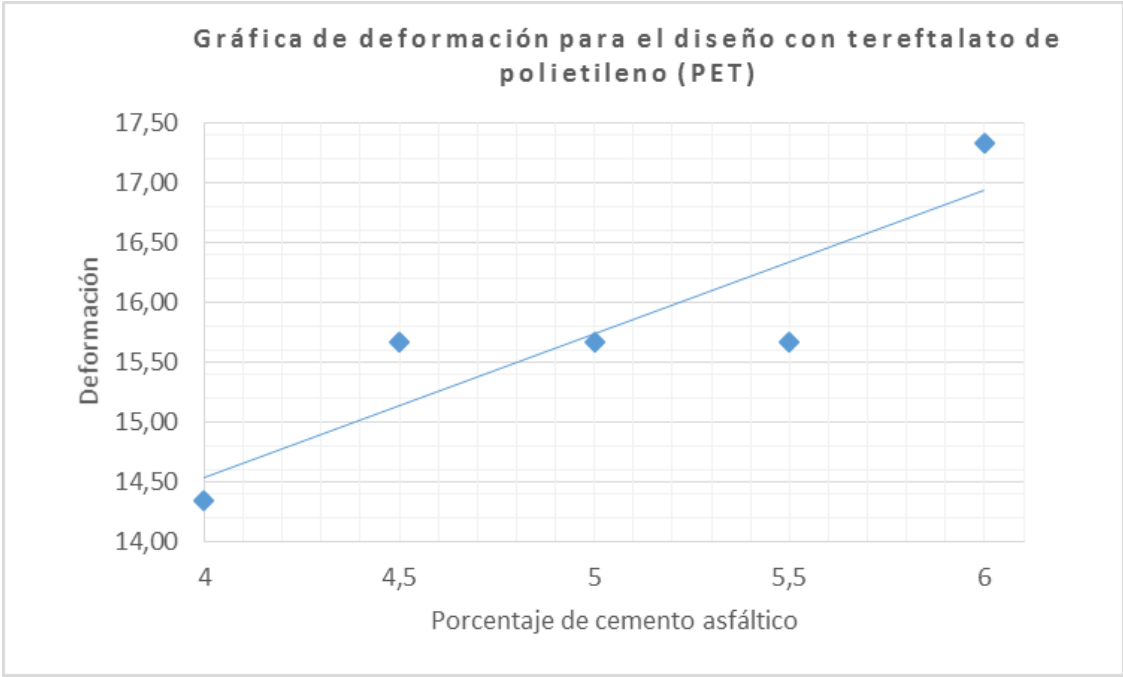
Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Gráfica de resultados de prueba estabilidad-flujo de Marshall para el diseño con tereftalato de polietileno (PET)**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 28. **Gráfica de resultados de deformación Marshall para diseño con tereftalato de polietileno (PET)**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presenta el análisis de los resultados obtenidos de ensayos correspondientes para el diseño propuesto normal y el diseño con tereftalato de polietileno (PET).

9.1. Resumen de resultados

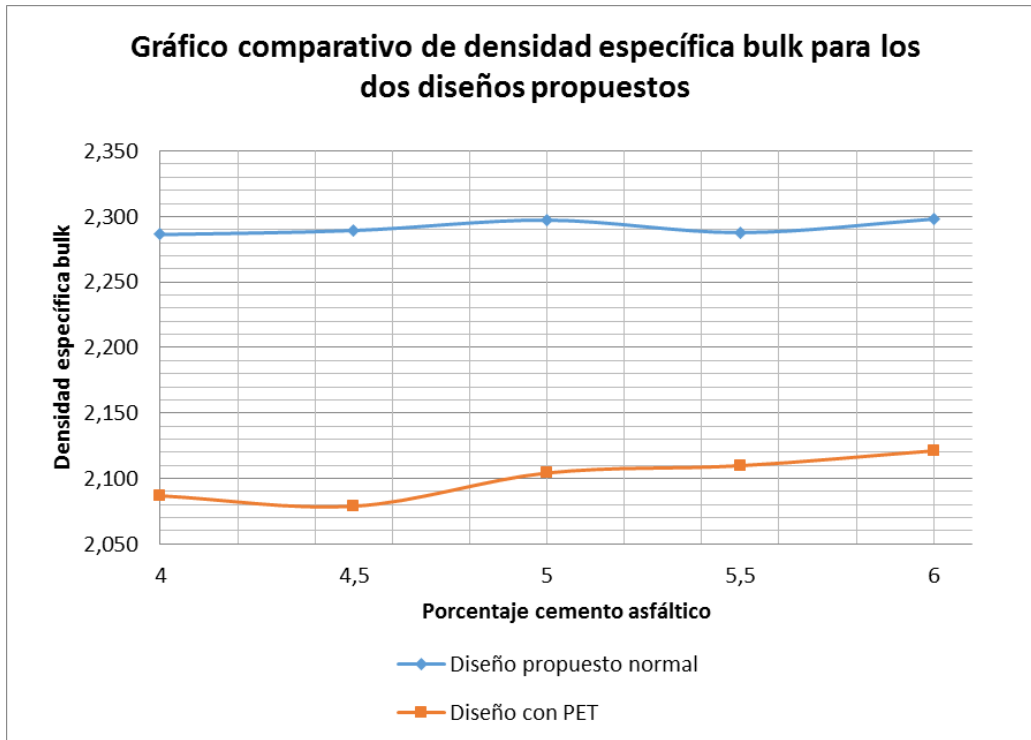
Para una mejor comprensión se presenta tablas resumen de los resultados correspondientes obtenidos en cada uno de los ensayos realizados con su variación:

Tabla XXXIII. **Cuadro comparativo de densidad específica bruta (Bulk)**

Comparación de densidad específica bulk para los dos diseños propuestos				
Porcentaje de bitumen (cemento asfáltico)	Diseño propuesto normal	Diseño con tereftalato de polietileno (PET)	Variación	
			Absoluta	Relativa
4	2,286	2,087	0,20	8,72
4,5	2,289	2,079	0,21	9,19
5	2,297	2,104	0,19	8,40
5,5	2,288	2,110	0,18	7,78
6	2,298	2,121	0,18	7,70

Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Gráfica comparativo de densidad específica bruta (Bulk)**



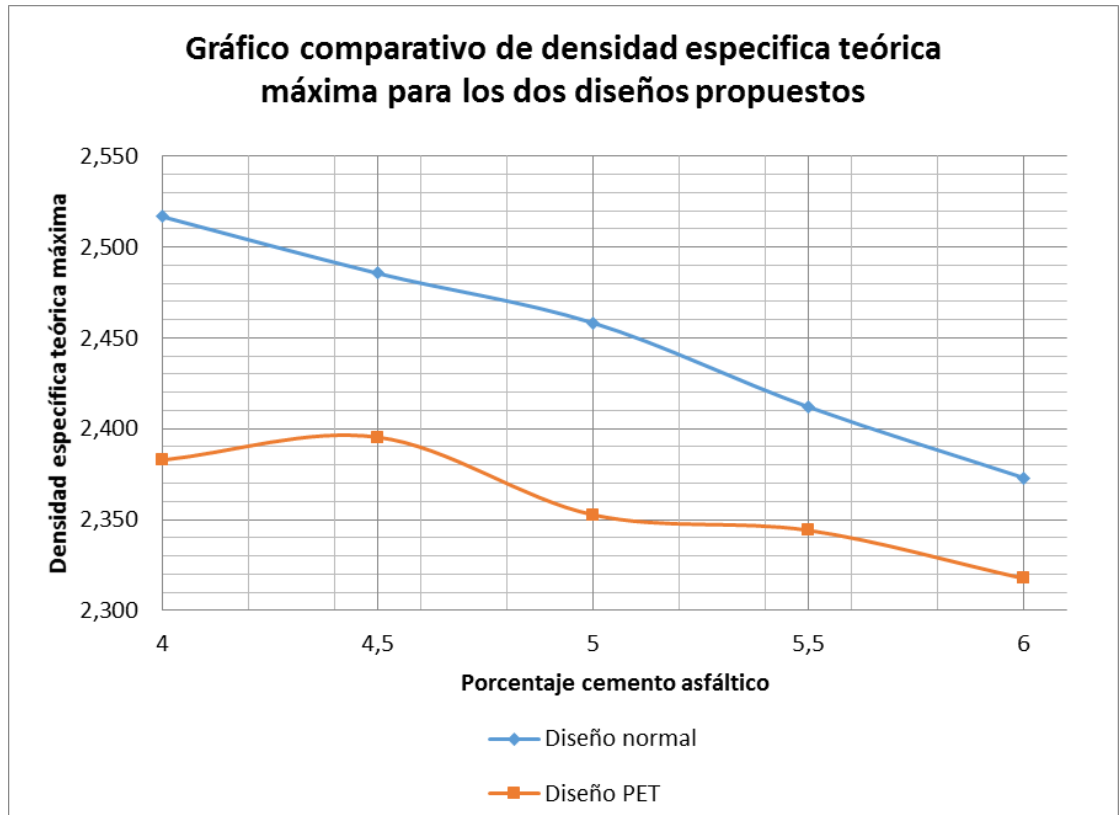
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XXXIV. **Cuadro comparativo de densidad específica teórica máxima**

Comparación de densidad específica teórica máxima para los dos diseños propuestos				
Porcentaje de bitumen (cemento asfáltico)	Diseño propuesto normal	Diseño con tereftalato de polietileno (PET)	Variación	
			Absoluta	Relativa
4	2,517	2,383	0,13	5,32
4,5	2,486	2,395	0,09	3,63
5	2,458	2,353	0,11	4,30
5,5	2,412	2,344	0,07	2,82
6	2,373	2,318	0,06	2,33

Fuente: elaboración propia.

Figura 30. Gráfica comparativo de densidad teórica máxima



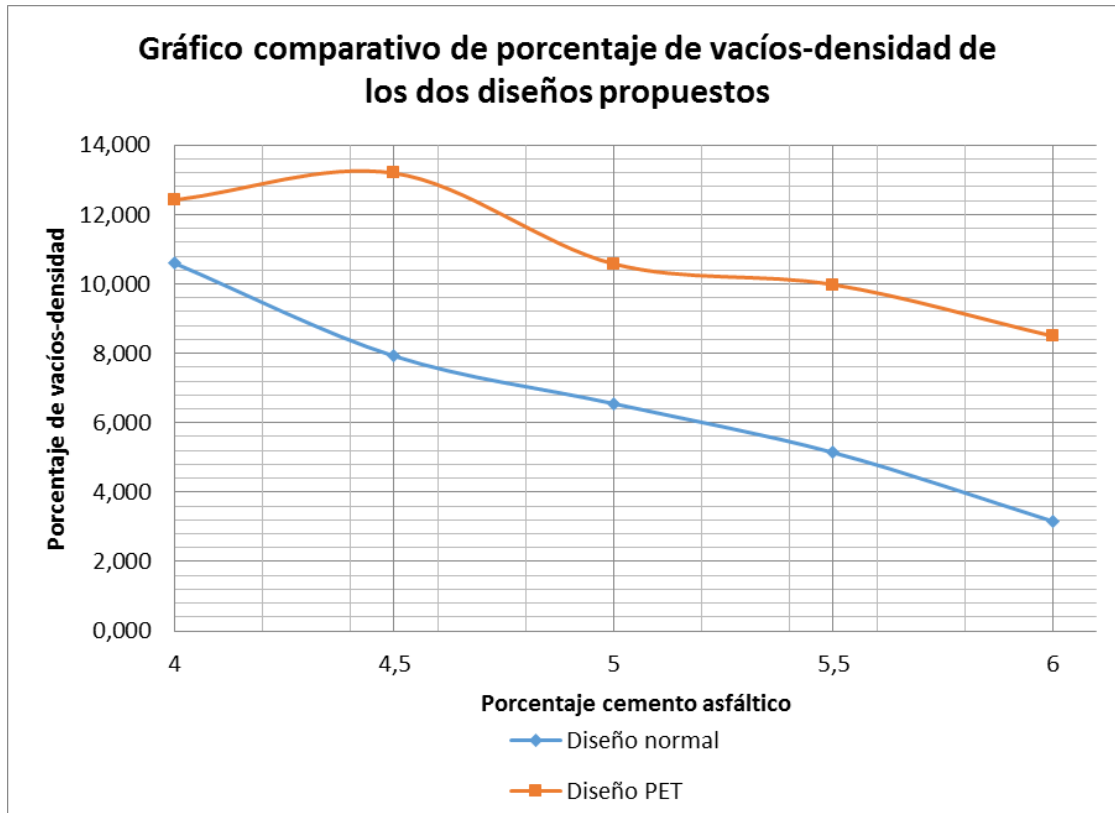
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XXXV. Cuadro comparativo de porcentaje de vacíos-densidad

Comparación porcentaje de vacíos-densidad de los dos diseños propuestos				
Porcentaje de bitumen (cemento asfáltico)	Diseño propuesto normal	Diseño con tereftalato de polietileno (PET)	Variación	
			Absoluta	Relativa
4	10,598	12,421	1,82	14,68
4,5	7,924	13,194	5,27	39,94
5	6,550	10,582	4,03	38,10
5,5	5,141	9,983	4,84	48,50
6	3,161	8,499	5,34	62,81

Fuente: elaboración propia.

Figura 31. Gráfico comparativo de porcentaje de vacíos-densidad



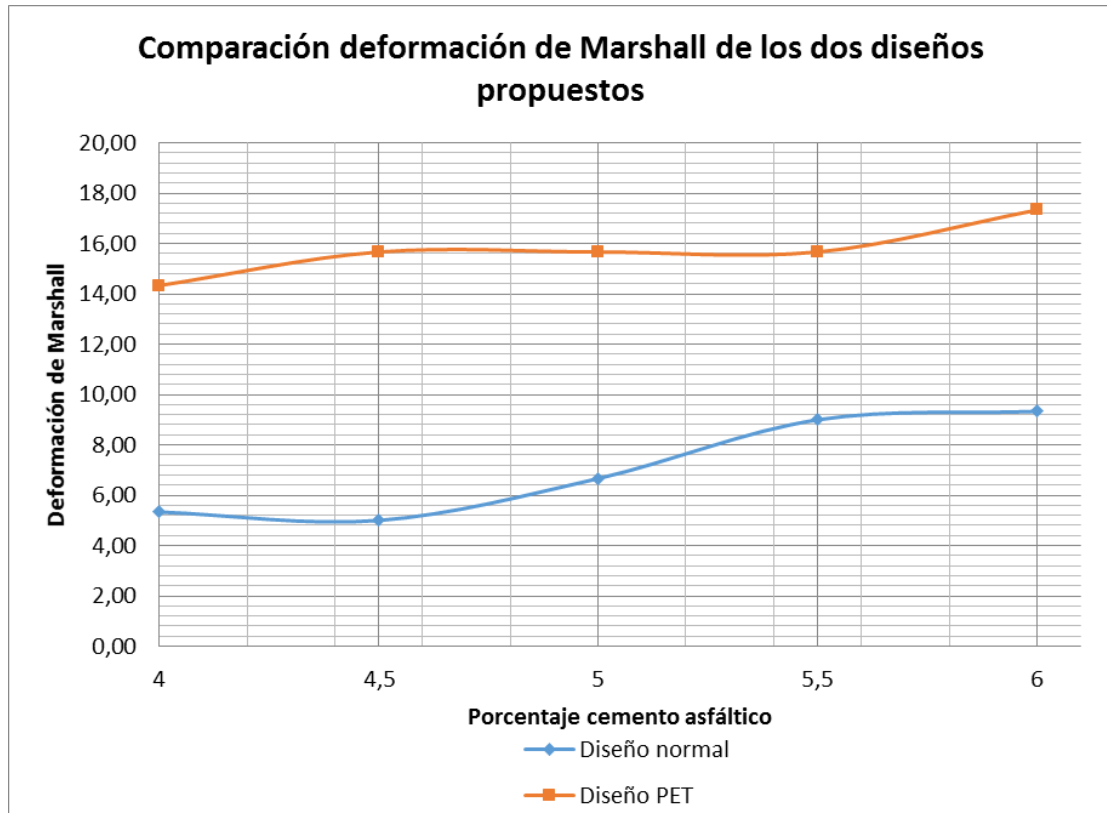
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XXXVI. Cuadro comparativo de deformación Marshall

Comparación deformación de Marshall de los dos diseños propuestos				
Porcentaje de bitumen (cemento asfáltico)	Diseño propuesto normal	Diseño con tereftalato de polietileno (PET)	Variación	
			Absoluta	Relativa
4	5,33	14,33	9,00	62,79
4,5	5,00	15,67	10,67	68,09
5	6,67	15,67	9,00	57,45
5,5	9,00	15,67	6,67	42,55
6	9,33	17,33	8,00	46,15

Fuente: elaboración propia.

Figura 32. Gráfico comparativo de deformación Marshall



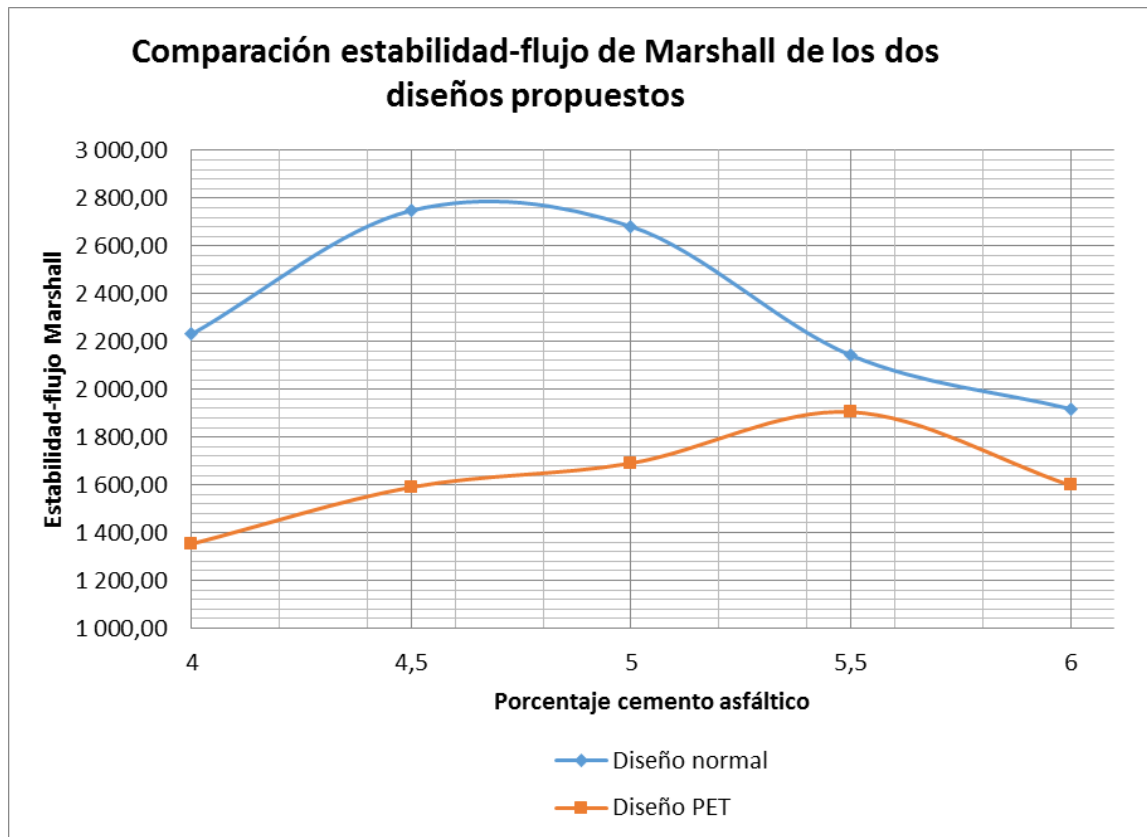
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XXXVII. Cuadro comparativo de estabilidad-flujo Marshall

Comparación estabilidad flujo de Marshall de los dos diseños propuestos				
Porcentaje de bitumen (cemento asfáltico)	Diseño propuesto normal	Diseño con tereftalato de polietileno (PET)	Variación	
			Absoluta	Relativa
4	2 231,25	1 353,08	878,17	39,36
4,5	2 748,33	1 590,66	1 157,67	42,12
5	2 682,01	1 690,99	991,02	36,95
5,5	2 142,75	1 905,28	237,47	11,08
6	1 918,19	1 598,67	319,52	16,66

Fuente: elaboración propia.

Figura 33. Gráfico comparativo de estabilidad-flujo de Marshall



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

9.2. Interpretación de resultados

Se presenta el análisis de los resultados descritos en los ensayos realizados del diseño de mezcla asfáltica con granulometría tipo E, con un diseño propuesto normal y otro diseño con tereftalato de polietileno (PET). En esta parte se dará a conocer el desempeño de las mezclas ante los parámetros que se requiere que cumplan en el diseño indicando en cada uno de los ensayos realizados de acuerdo con las especificaciones del “Libro Azul”.

A continuación se presenta el análisis en forma separada para la mezcla normal de igual forma para la mezcla con tereftalato de polietileno para una comprensión más profunda ya que, para lograr un análisis más exacto de los resultados, este fue obtenido de la interpretación de los datos comparativos, tanto de las tablas y gráficas de las dos mezclas asfálticas.

9.2.1. Mezcla asfáltica del diseño propuesto normal estándar

Comenzando el análisis de la mezcla asfáltica de diseño propuesto normal se determina que el contenido óptimo de bitumen (cemento asfáltico) para este diseño el cual se observa en la gráfica de porcentaje de vacíos vs bitumen (cemento asfáltico) (figura 31) propuesto, que se encuentra en los límites proporcionales del rango de 5,2 a 6 %.

La determinación de este rango se localizó por medio del resultado de porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica, el cual, con esta cantidad de bitumen, el porcentaje está dentro de los límites que se encuentran en la sección 401 del “Libro Azul”. Estos rangos son de un 3 a 5 % que son determinantes en el desempeño de la mezcla asfáltica, de tal forma que con una cantidad menor de bitumen la mezcla no cumple con los parámetros, esto se debe a que conforme se incrementa la cantidad de cemento asfáltico, va disminuyendo la presencia de vacíos en la mezcla.

Por otra parte, al observar la gráfica de gravedad específica bruta (bulk) (ver figura 29) se determina que el peso específico va en aumento poco a poco, esto se debe a que cuando se incrementa el porcentaje de bitumen (cemento asfáltico), esto provoca que disminuyan el porcentaje de vacíos como se observa en la gráfica de densidad teórica máxima (ver figura 30), esta gráfica en un punto

tiende a disminuir debido a que la densidad del bitumen (cemento asfáltico) tiende un valor de densidad similar a la del agua, esto provoca que disminuya.

Este análisis de acuerdo al valor mínimo de estabilidad Marshall (1 200 lbf), que debe soportar una probeta de mezcla compactada, se observa que la misma cumplió con este ensayo para todos los porcentajes de bitumen (cemento asfáltico) utilizados (figura 33). Tomando el máximo valor de estabilidad fue del valor 4,6 % de bitumen (cemento asfáltico), sin embargo, utilizando la cantidad óptima de bitumen (cemento asfáltico), la estabilidad es menor, pero todavía supera al valor mínimo de diseño indicado anteriormente.

Por otra parte, los valores de deformación Marshall no se encuentran todos dentro de los parámetros de diseño. En la figura 32 se nota que, con un rango de 5,2 a 6 % de cemento asfáltico, la mezcla con los valores de porcentaje bajo de este rango tiende a disminuir notablemente su deformación, por lo que, que para este caso, la relación entre el aumento en la cantidad de asfalto y la deformación es proporcional.

Se determina por lo tanto, que este diseño de mezcla propuesta normal cumple con el “Libro Azul”. Al analizar los ensayos propuestos de la norma ASTM D1559 se entiende que si cumple con los parámetros de características físicas y propiedades mecánicas debido a que la granulometría es acorde y cumple con las características físicas y mecánicas.

9.2.2. Mezcla asfáltica del diseño con el polímero tereftalato de polietileno (PET)

Comenzando el análisis de la mezcla asfáltica de diseño con tereftalato de polietileno (PET) se determina que el contenido óptimo de bitumen (cemento asfáltico) para este diseño, el cual se observa en la gráfica de porcentaje de vacíos vs cemento asfáltico (figura 31), no es un factor puntual, ya que no se encuentra en los límites de porcentajes de vacíos.

La determinación de este resultado se visualiza por medio de la gráfica de porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica. El porcentaje de vacíos no se encuentra dentro de los límites que se establece en la sección 401 del “Libro Azul”, los cuales son de un 3 a 5 %, de manera que la mezcla no cumple con los parámetros; esto se debe a que no importando la cantidad de bitumen (cemento asfáltico), el material adicionado del polímero tereftalato de polietileno actúa como un porcentaje de vacíos adicional en la mezcla.

Por otra parte, al observar la gráfica de gravedad específica bruta (bulk) (ver figura 29) se determina que el peso específico va en aumento poco a poco; esto se debe a que cuando se incrementa el porcentaje de bitumen (cemento asfáltico), también se observa en la gráfica de densidad teórica máxima (ver figura 30), esta gráfica en un punto tiende a disminuir, manteniéndose en tramos; esto es debido a que la densidad del bitumen (cemento asfáltico) tiende un valor de densidad similar a la del agua; esto provoca que disminuya.

El análisis de acuerdo al valor mínimo de estabilidad Marshall (1 200 lbf), que debe soportar una probeta de mezcla compactada, se observa que la misma cumplió con este ensayo para todos los porcentajes de cemento asfáltico utilizados en lo mínimo con valores bajos de carga. Tomando el máximo valor de

estabilidad, que fue, del valor 5,5 % de bitumen (cemento asfáltico) obtuvo mayor valor de estabilidad de Marshall; sin embargo, en los demás ensayos la estabilidad que es muy baja. Por otra parte, los valores de flujo Marshall no se encuentran ninguno dentro de los parámetros de diseño. En la figura 32 se nota que todos los valores de deformación en los rangos de bitumen (cemento asfáltico), las deformaciones son excesivamente altos en mezcla asfáltica con tereftalato de polietileno (PET).

El análisis de la prueba de Stripping para las probetas del diseño de mezcla asfáltica con tereftalato de polietileno (PET) se determina por la separación de los agregados y el material cementante; en este caso no hubo necesidad de realizar esta prueba ya que a simple vista las partículas de este polímero no se adhirieron completamente a los agregados ni se revestía al material cementante, por lo que se separaba fácilmente y no mantenía una uniformidad de la probeta.

Se determina por lo tanto, este diseño de mezcla adicionando tereftalato de polietileno (PET) no cumple con el “Libro Azul”, el problema difiere en la adición del polímero tereftalato de polietileno al bitumen o cemento asfáltico y al analizar los ensayos propuestos de la norma ASTM D1559 se entiende que no cumple con los parámetros de características físicas y propiedades mecánicas, debido a que la granulometría tiende a tener un material que no es compatible, por lo que no cumple con las características físicas y mecánicas.

CONCLUSIONES

1. Las características físicas y propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas evaluadas son muy distintas, debido a que la mezcla asfáltica con tereftalato de polietileno (PET) tiene deficiencias notables, comparándolos con un diseño de mezcla propuesto normal que cumple los parámetros mínimos como adherencia de los agregados, carga, deformación y porcentaje de vacíos, estos son fundamentales en la realización de una mezcla asfáltica normal; por otra parte, al realizar un diseño de mezcla asfáltica que tenga los parámetros sugeridos en el rango granulométrico en la sección 401 del “Libro Azul”, no significa que cumplirá lo sugerido y que esté en condiciones óptimas. Por esta razón se emplean pruebas con diferentes diseños granulométricos para optimizar la calidad de las mezclas asfálticas.
2. Con base en la investigación de recolección de datos estadísticos aproximados de desechos sólidos en Guatemala, se genera de 12 000 a 14 000 toneladas métricas por día según el trabajo de graduación del Ing. Nelson Rolando Colomo Ruiz. El porcentaje de residuos sólidos en el año 2012 fue de 2,4 por ciento disminuyendo a un 1,8 por ciento en el año 2013, según el documento de ENCOVI del Instituto Nacional de Estadística gracias a los programas de recolección de sólidos. En Guatemala uno de los problemas más difíciles es la recolección de basura, el cual se representa notablemente en las gráficas y tablas realizadas, que relacionan los porcentajes de desperdicios generados en cada departamento, esto es por la costumbre y educación que tiene cada persona. Las formas principales de eliminar los desechos sólidos es por el

servicio municipal, quemándola y tirándola en la calle. La contaminación al medio ambiente va en aumento ya que cada día se acumula más desechos de este material.

3. La resistencia de la mezcla asfáltica con tereftalato de polietileno (PET) y la mezcla asfáltica propuesta normal, cumple superando el rango de estabilidad que tiene un valor mínimo de 1 200 lbf. En la mezcla asfáltica donde se utilizó tereftalato de polietileno (PET) se obtuvieron valores abajo de este límite, siendo no es estable. El tereftalato de polietileno (PET) actúa como un vacío y además la adherencia es mínima entre agregados y el bitumen (cemento asfáltico), por lo que no es recomendable utilizarlo como agregado.
4. Para la comparación de resultados obtenidos de la densidad específica bulk para el diseño propuesto normal, comparados con el diseño con tereftalato de polietileno (PET), resultan tener una variación constante de pesos entre los materiales, siendo más livianos los agregados del diseño con tereftalato de polietileno (PET). También los resultados de la densidad específica teórica máxima comparándolos, son más livianos los del diseño con tereftalato de polietileno (PET), esto por consecuencia a valores bajos de las gravedades específicas; mientras más bajos son resulta un aumento de los valores de porcentaje de vacíos, por esa razón no cumple el diseño con tereftalato de polietileno (PET) con este parámetro propuesto en la sección 401 del "Libro Azul".
5. Con base en la metodología de Marshall se observa que el desempeño del diseño de mezcla asfáltica con tereftalato de polietileno (PET) no es óptimo, como tal no cumple las especificaciones requeridas como establece la Norma ASTM D1559, esto indica que con respecto a los

parámetros más importantes como carga, deformación y porcentaje de vacíos no cumple, esto debido a que las características de adherencia que posee este material con los agregados y el bitumen (cemento asfáltico) es mínima, lo que provoca que no sea óptimo.

RECOMENDACIONES

1. Para la realización de la metodología de Marshall y obtener resultados confiables de los ensayos realizados en el diseño de mezcla asfáltica, se recomienda realizar el procedimiento para tres o cuatro probetas con diferente variación de contenido de asfalto en la mezcla. Esto se realiza con el objetivo de que aunque se utilice el mismo procedimiento, éstas no son 100 % homogéneas entre ellas. Al realizar tres probetas por contenido de asfalto tiene el fin de poder obtener un resultado confiable del ensayo a partir de un promedio entre las dos probetas que tengan mayor similitud en sus datos numéricos.
2. En la utilización de polímeros en mezclas asfálticas como agregado, detallados los resultados previos por medio de ensayos de laboratorio, no se recomienda utilizar el polímero tereftalato de polietileno (PET) como agregado, debido a que la mezcla asfáltica no mejora sus características físicas y propiedades mecánicas, que son requeridas con los parámetros de diseño que requiere la Dirección General de Caminos, y en la norma ASTM D1559.
3. Para tener una mezcla de cemento asfáltico que cumplan las especificaciones técnicas de la Dirección General de Caminos se recomienda que se realice más de un diseño granulométrico por cada tipo de cemento asfáltico a utilizar, así de esta forma mejorar las propiedades físicas y mecánicas para que la mezcla asfáltica presente propiedades óptimas.

4. Para conocer más acerca del procedimiento de diseño de mezclas asfálticas en caliente, los ensayos que se deben realizar y la interpretación de los resultados de los mismos, se puede tomar de guía el Manual de Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos de Guatemala y el Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras del Instituto Nacional de Vías de Colombia, ya que ambos manuales toman como referencia las normas ASTM y AASHTO.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Society for Testing and Materials. *Test method for resistance of plastic flow of bituminous mixtures using Marshall Apparatus ASTM D1559*. EUA: ASTM, 2001. 4 p.
2. AVELLÁN CRUZ, Martha Dina. *Asfálticos Modificados con Polímeros*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2007. 15 p.
3. COLOMO RUIZ, Nelson Rolando. *Ingeniería del Reciclado en Envases de Tereftalato de Polietileno (PET)*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2013. 18 p.
4. Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. Guatemala: Cámara Guatemalteca de la Construcción, 2001. 724 p.
5. Instituto Nacional de Estadística. *Compendio Estadístico Ambiental*. Guatemala: (INE, 2015). 139 p.
6. Instituto Nacional de Vías. *Manual de normas de ensayo de materiales para carreteras, Secciones 700 y 800, Materiales y mezclas asfálticas y prospección de pavimentos*. Colombia: INVIAS, 2012. 626 p.

7. LEÓN FAJARDO, José Luis. *Criterios para el Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1996. 18 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. **Recipiente con la cantidad de cada uno de los diferentes tamaños de material del diseño de mezcla, previo a ser mezclado para la realización de una pastilla de mezcla asfáltica de 1 050 g.**



Fuente: Sección de asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC

Apéndice 2. **Recipiente con la cantidad de cada uno de los diferentes tamaños de material del diseño de mezcla agregando tereftalato de polietileno (PET), previo a ser mezclado para la realización de una pastilla de mezcla asfáltica de 1 050 g.**



Fuente: Sección de asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC

Apéndice 3. **Medición de temperatura de la mezcla colocada en el molde previo a la compactación, por medio del termómetro de vástago**



Fuente: Sección de asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC

Apéndice 4. **Espécimen de mezcla asfáltica colocado en las mordazas para la realización del ensayo de estabilidad y flujo Marshall**



Fuente: Sección de asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC

ANEXOS

Anexo 1. Tabla Humboldt Mfg. Co. corrección estabilidad Marshall

HUMBOLDT MFG. CO.
7300 W. AGATITE AVE.
NORRIDGE, IL 60706

4 SEP 20

RECOMMEND RECALIBRATION ONE YEAR FROM START OF USE AFTER LAST CALIBRATION
CALIBRATION FOR MODEL H-4454.100 11000 LBF SERIAL 2366 BY *B. Heckerman*
CALIBRATED USING LOAD CELL 626314 CAL. DATE 10/11/07 DEFLT=.0001 in.

LBF	DEFLT	LBF	DEFLT	LBF	DEFLT	LBF	DEFLT	LBF	DEFLT
0	.1	1000	105.1	3500	370.0	6000	637.9	8500	908.9
20	2.2	1050	110.4	3550	375.3	6050	643.3	8550	914.4
40	4.3	1100	115.7	3600	380.7	6100	648.7	8600	919.8
60	6.4	1150	121.0	3650	386.0	6150	654.1	8650	925.3
80	8.5	1200	126.2	3700	391.3	6200	659.5	8700	930.7
100	10.5	1250	131.5	3750	396.7	6250	664.9	8750	936.2
120	12.6	1300	136.8	3800	402.0	6300	670.3	8800	941.6
140	14.7	1350	142.0	3850	407.3	6350	675.7	8850	947.1
160	16.8	1400	147.3	3900	412.7	6400	681.1	8900	952.6
180	18.9	1450	152.6	3950	418.0	6450	686.5	8950	958.0
200	21.0	1500	157.9	4000	423.3	6500	691.9	9000	963.5
220	23.1	1550	163.2	4050	428.7	6550	697.3	9050	968.9
240	25.2	1600	168.4	4100	434.0	6600	702.7	9100	974.4
260	27.3	1650	173.7	4150	439.4	6650	708.1	9150	979.9
280	29.4	1700	179.0	4200	444.7	6700	713.5	9200	985.3
300	31.5	1750	184.3	4250	450.1	6750	718.9	9250	990.8
320	33.6	1800	189.6	4300	455.4	6800	724.3	9300	996.3
340	35.7	1850	194.9	4350	460.8	6850	729.7	9350	1001.8
360	37.8	1900	200.1	4400	466.1	6900	735.1	9400	1007.2
380	39.9	1950	205.4	4450	471.5	6950	740.5	9450	1012.7
400	42.0	2000	210.7	4500	476.8	7000	746.0	9500	1018.2
420	44.1	2050	216.0	4550	482.2	7050	751.4	9550	1023.6
440	46.2	2100	221.3	4600	487.5	7100	756.8	9600	1029.1
460	48.3	2150	226.6	4650	492.9	7150	762.2	9650	1034.6
480	50.4	2200	231.9	4700	498.2	7200	767.6	9700	1040.1
500	52.5	2250	237.2	4750	503.6	7250	773.0	9750	1045.6
520	54.6	2300	242.5	4800	508.9	7300	778.5	9800	1051.0
540	56.7	2350	247.8	4850	514.3	7350	783.9	9850	1056.5
560	58.8	2400	253.1	4900	519.7	7400	789.3	9900	1062.0
580	61.0	2450	258.4	4950	525.0	7450	794.7	9950	1067.5
600	63.1	2500	263.7	5000	530.4	7500	800.2	10000	1073.0
620	65.2	2550	269.0	5050	535.8	7550	805.6	10050	1078.5
640	67.3	2600	274.3	5100	541.1	7600	811.0	10100	1084.0
660	69.4	2650	279.6	5150	546.5	7650	816.4	10150	1089.5
680	71.5	2700	284.9	5200	551.9	7700	821.9	10200	1094.9
700	73.6	2750	290.2	5250	557.2	7750	827.3	10250	1100.4
720	75.7	2800	295.5	5300	562.6	7800	832.7	10300	1105.9
740	77.8	2850	300.8	5350	568.0	7850	838.2	10350	1111.4
760	79.9	2900	306.2	5400	573.3	7900	843.6	10400	1116.9
780	82.0	2950	311.5	5450	578.7	7950	849.0	10450	1122.4
800	84.1	3000	316.8	5500	584.1	8000	854.5	10500	1127.9
820	86.2	3050	322.1	5550	589.5	8050	859.9	10550	1133.4
840	88.3	3100	327.4	5600	594.9	8100	865.4	10600	1138.9
860	90.4	3150	332.7	5650	600.2	8150	870.8	10650	1144.4
880	92.5	3200	338.1	5700	605.6	8200	876.2	10700	1149.9
900	94.6	3250	343.4	5750	611.0	8250	881.7	10750	1155.4
920	96.7	3300	348.7	5800	616.4	8300	887.1	10800	1160.9
940	98.8	3350	354.0	5850	621.8	8350	892.6	10850	1166.4
960	100.9	3400	359.3	5900	627.2	8400	898.0	10900	1172.0
980	103.0	3450	364.7	5950	632.5	8450	903.5	10950	1177.5

Fuente: Humboldt Mfg. Co. p. 1.

Anexo 2. **Tabla de factores de corrección estabilidad-flujo Marshall**

Volumen de la probeta (cm ³)	Espesor de la probeta		Factor de corrección
	mm	pg	
290 a 301	36,5	1,44	3,03
302 a 316	38,1	1,50	2,78
317 a 328	39,7	1,56	2,50
329 a 340	41,3	1,62	2,27
341 a 353	42,9	1,69	2,08
354 a 367	44,4	1,75	1,92
368 a 379	46,0	1,81	1,79
380 a 392	47,6	1,88	1,67
393 a 405	49,2	1,94	1,56
406 a 420	50,8	2,00	1,47
421 a 431	52,4	2,06	1,39
432 a 443	54,0	2,12	1,32
444 a 456	55,6	2,19	1,25
457 a 470	57,2	2,25	1,19
471 a 482	58,7	2,31	1,14
483 a 495	60,3	2,38	1,09
496 a 508	61,9	2,44	1,04
509 a 522	63,5	2,50	1,00
523 a 535	65,1	2,56	0,96
536 a 546	66,7	2,62	0,93
547 a 559	68,3	2,69	0,89
560 a 573	69,8	2,75	0,86
574 a 585	71,4	2,81	0,83
586 a 598	73,0	2,88	0,81
599 a 610	74,6	2,94	0,78
611 a 626	76,2	3,00	0,76

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones Generales Para Construcción de Carreteras y Puentes*. p. 489.

Anexo 3. Ficha técnica del polímero tereftalato de polietileno (PET)



FICHA TÉCNICA DE PRODUCTOS

SustainPet® 800 P-Pellet

1 DESCRIPCIÓN

La resina SustainPet® 800 P es un copolímero de PET (por sus siglas en inglés, polyethylene terephthalate) obtenido del proceso de transformación de botellas de PET post consumo, en resina PET con grado alimenticio y certificación FDA (por su siglas en inglés, Food and Drug Administration).

2 PROPIEDADES

Parámetro	Valor Estándar	Unidad	Límite	Método Analítico
Viscosidad Intrínseca	0.80	dl/gr	±0.02	IT – GC – 201
Humedad	<1.0	%	---	IT – GC – 203
Contenido de Acetaldehído	<1.0	ppm	---	Laboratorio externo
Color (valor L*)	>67	CIELab	---	IT – GC – 204
Color (valor b*)	<3	CIELab	---	IT – GC – 204
Color (valor a*)	>-3	CIELab	---	IT – GC – 204
Forma Pellet	Esférica	---	---	---

3 APLICACIONES/USOS

SustainPet® 800 P es utilizado para la fabricación de envases para refrescos, agua, leche, jugos, bebidas carbonatadas y no carbonatadas y otras aplicaciones industriales como envases para detergentes, textiles y embalajes.

4 CERTIFICACIÓN

La tecnología con la que se elabora la resina SustainPet® 800 P, cuenta con certificación FDA según literales C a H descritos en la tabla 2 "Condiciones de uso", de la sección Empaques y Substancias en Contacto con Alimentos (FSC) del sitio web.

<http://www.fda.gov/food/ingredientspackaginglabeling/packagingfcs/foodtypesconditionsofuse/default.htm>

5 PRESENTACIÓN

Pellet grado FDA para uso en industria alimenticia en colores natural, verde y azul.

**Nota: Los valores arriba indicados son de referencia. Pueden utilizarse como orientación para el empleo pero se deja a criterio del usuario la necesidad de validar dichos valores en función del uso que se dará al producto final.*


**La resina SustainPet® es considerada adecuada para aplicaciones de envasado de alimentos sobre la base de la normativa FDA 21CFR Sección 174.5 de Estados Unidos.*

Avenida Petapa y 56 calle, zona 12
Tel.: (502) 2326-5700


reciclad@icasa.com.gt
www.recicla.com.gt

Fuente: INGROUP.

Anexo 4. Resultados de densidad específica teórica máxima



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



INFORME NUMERO: 007 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 36496

No. 09516

INTERESADO: BRYAN JOSUE ORTIZ MARROQUÍN - 2011146617

PROYECTO: TESIS: MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE, ADICIONANDO TEREFALATO DE POLIETILENO POR EL MÉTODO MARSHALL

DIRECCION: CII/FIUSAC LABORATORIO DE ASFALTOS

ENSAYO: DENSIDAD ESPECIFICA TEORICA MAXIMA "RICE" ASTM 2041

FECHA: 11 DE ENERO DEL 2017

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE AGREGADO FINO Y GRUESO

NORMAL

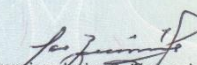
PROBETA	GMM
4% AC 20	2,5170
4,5% AC 20	2,4860
5% AC 20	2,4580
5,5% AC 20	2,4120
6% AC 20	2,3730

PET


PROBETA	GMM
4% AC 20	2,3830
4,5% AC 20	2,3950
5% AC 20	2,3530
5,5% AC 20	2,3440
6% AC 20	2,3180


Atentamente,

Vo. Bo. :



Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz
DIRECTOR CII/USAC





Ing. Dario Francisco Lucas Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos

FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—
 Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
 Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
 Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Usac.

Anexo 5. **Resultado densidad específica bruta (bulk) para diseño normal**



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



INFORME NUMERO: 005 L.B.A
ORDEN DE TRABAJO: 36496
No. 09514

INTERESADO: BRYAN JOSUE ORTIZ MARROQUÍN - 201114617

PROYECTO: TESIS: MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE, ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO POR EL MÉTODO MARSHALL

DIRECCION: CII/FIUSAC LABORATORIO DE ASFALTOS

ENSAYO: DENSIDAD ESPECIFICA DE BULK ASTM 2726-05a

FECHA: 11 DE ENERO DEL 2017

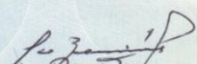
MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE NORMAL (AGREGADO GRUESO Y FINO)

PROBETA	GRAVEDAD ESPECIFICA
1 AC 20 4 %	2,280
2 AC 20 4 %	2,287
3 AC 20 4 %	2,292
4 AC 20 4,5 %	2,280
5 AC 20 4,5 %	2,318
6 AC 20 4,5 %	2,270
7 AC 20 5 %	2,302
8 AC 20 5 %	2,288
9 AC 20 5 %	2,302
10 AC 20 5,5 %	2,290
11 AC 20 5,5 %	2,289

PROBETA	GRAVEDAD ESPECIFICA
12 AC 20 5,5%	2,285
13 AC 20 6%	2,327
14 AC 20 6%	2,297
15 AC 20 6%	2,270

Atentamente,

Vo. Bo. :



Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz
DIRECTOR CII/USAC





Ing. Benito Francisco Lucas Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos


FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—
 Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
 Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
 Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Usac.

Anexo 6. **Resultados densidad específica bruta (bulk) para diseño con tereftalato de polietileno (PET)**



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



INFORME NUMERO: 006 L.B.A

ORDEN DE TRABAJO: 36496

No. 09515

INTERESADO: BRYAN JOSUE ORTIZ MARROQUÍN - 201114617

PROYECTO: TESIS: MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE, ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO POR EL MÉTODO MARSHALL

DIRECCION: CII/FIUSAC LABORATORIO DE ASFALTOS

ENSAYO: DENSIDAD ESPECIFICA DE BULK ASTM 2726-05a

FECHA: 11 DE ENERO DEL 2017

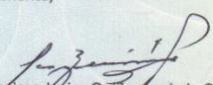
MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE PET (AGREGADO GRUESO Y FINO)

PROBETA	GRAVEDAD ESPECIFICA
1 AC 20 4 %	2,099
2 AC 20 4 %	2,114
3 AC 20 4 %	2,047
4 AC 20 4,5 %	2,075
5 AC 20 4,5 %	2,114
6 AC 20 4,5 %	2,047
7 AC 20 5%	2,112
8 AC 20 5 %	2,069
9 AC 20 5 %	2,132
10 AC 20 5,5 %	2,135
11 AC 20 5,5 %	2,097



PROBETA	GRAVEDAD ESPECIFICA
12 AC 20 5,5%	2,097
13 AC 20 6%	2,119
14 AC 20 6%	2,127
15 AC 20 6%	2,118

Atentamente,

Vo. Bo. :



Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz
DIRECTOR CII/USAC

Ing. Daniel Francisco Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos


FACULTAD DE INGENIERÍA –USAC–
 Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
 Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
 Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Usac.

Anexo 7. **Resultados estabilidad de flujo Marshall para diseño normal**



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



No. 09510

INFORME NUMERO: 001 L.B.A. ORDEN DE TRABAJO: 36496

INTERESADO: BRYAN JOSUE ORTIZ MARROQUÍN - 201114617

PROYECTO: TESIS: MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE, ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO POR EL MÉTODO MARSHALL

DIRECCION: CII/FIUSAC LABORATORIO DE ASFALTOS

ENSAYO: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 1559

FECHA: 11 DE ENERO DEL 2017

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE NORMAL (AGREGADO GRUESO Y FINO)

PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
1 AC 20 4%	2350,25	6
2 AC 20 4%	2201,50	5
3 AC 20 4%	2142,00	5
4 AC 20 4,5%	2607,83	5
5 AC 20 4,5%	3399,87	5
6 AC 20 4,5%	2237,27	5
7 AC 20 5%	2869,07	6
8 AC 20 5%	2225,21	8

Atentamente,

Vo. Bo. : 

Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz
DIRECTOR CII/USAC






Ing. Darío Francisco Mejías Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos




FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Usac.

Anexo 8. **Resultados estabilidad de flujo Marshall para diseño normal**



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



No. **09511**

INFORME NUMERO: 002 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 36496

INTERESADO: BRYAN JOSUE ORTIZ MARROQUÍN - 201114617

PROYECTO: TESIS: MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE, ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO POR EL MÉTODO MARSHALL

DIRECCION: CII/FIUSAC LABORATORIO DE ASFALTOS

ENSAYO: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 1559

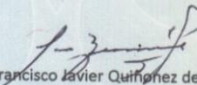
FECHA: 11 DE ENERO DEL 2017

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE NORMAL (AGREGADO GRUESO Y FINO)

PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
9 AC 20 5%	2951,72	6
10 AC 20 5,5%	2135,21	10
11 AC 20 5,5%	2146,51	8
12 AC 20 5,5%	2147,51	9
13 AC 20 6%	1955,78	12
14 AC 20 6%	1925,09	8
15 AC 20 6%	1873,69	8

Atentamente,

Vo. Bo. :



 Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz
 DIRECTOR CII/USAC


 Ing. Darío Francisco Mazariegos
 Jefe Laboratorio de Asfaltos


FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—
 Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
 Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
 Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Usac.

Anexo 9. Resultados estabilidad de flujo Marshall para diseño PET



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



No. 09512

INFORME NUMERO: 003 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 36496

INTERESADO: BRYAN JOSUE ORTIZ MARROQUÍN - 201114617

PROYECTO: TESIS: MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE, ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO POR EL MÉTODO MARSHALL

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA

ENSAYO: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 1559

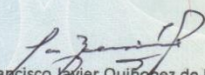
FECHA: 11 DE ENERO DEL 2017

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE PET (AGREGADO GRUESO Y FINO)


PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
1 AC 20 4%	1226,23	14
2 AC 20 4%	1508,00	14
3 AC 20 4%	1325,00	15
4 AC 20 4,5%	1394,11	15
5 AC 20 4,5%	1394,11	15
6 AC 20 4,5%	1600,00	17
7 AC 20 5%	2288,00	18
8 AC 20 5%	1334,20	15


Atentamente,

Vo. Bo. :



Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz
DIRECTOR CII/USAC





Ing. Dario Francisco Lucas Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos


FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Usac.

Anexo 10. Resultados estabilidad de flujo Marshall para diseño PET



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



No. 09513

INFORME NUMERO: 004 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 36496

INTERESADO: BRYAN JOSUE ORTIZ MARROQUÍN - 201114617

PROYECTO: TESIS: MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE, ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO POR EL MÉTODO MARSHALL

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA

ENSAYO: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 1559

FECHA: 11 DE ENERO DEL 2017

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE PET (AGREGADO GRUESO Y FINO)

PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
9 AC 20 5%	1450,76	14
10 AC 20 5,5%	2326,95	15
11 AC 20 5,5%	1728,84	15
12 AC 20 5,5%	1660,04	17
13 AC 20 6%	1662,25	18
14 AC 20 6%	1580,50	19
15 AC 20 6%	1553,25	15

Atentamente,

Vo. Bo. :



Ing. Francisco Javier Guinonez de la Cruz
DIRECTOR CII/USAC



Ing. Darío Francisco Casas Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos

FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Usac.