



**Diseño de asfaltos modificados como base para el desarrollo de láminas
asfálticas impermeabilizantes a partir de tereftalato de polietileno reciclado y
asfalto AC-20**

Flores Pinto, Jonathan Paúl

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Petroquímica

Trabajo de Unidad de Integración Curricular, previo a la obtención del título de
Petroquímico

Dr. Urrutia Goyes, Edgar Ricardo, PhD.

Latacunga, 13 de abril del 2021



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE PETROQUÍMICA

Certificación

Certifico que el trabajo de Unidad de Integración Curricular, “**DISEÑO DE ASFALTOS MODIFICADOS COMO BASE PARA EL DESARROLLO DE LÁMINAS ASFÁLTICAS IMPERMEABILIZANTES A PARTIR DE TERFTALATO DE POLIETILENO RECICLADO Y ASFALTO AC-20**” fue realizado por el señor: **Flores Pinto, Jonathan Paúl**, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, abril de 2021

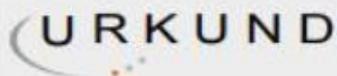


Firmado electrónicamente por:
**EDGAR RICARDO
URRUTIA GOYES**

Dr. Urrutia Goyes, Edgar Ricardo, PhD.

C.C.: 1803599313

Análisis Urkund



Urkund Analysis Result

Analysed Document: Tesis_Flores_rev0.docx (D101380461)
Submitted: 4/12/2021 4:30:00 PM
Submitted By: jpflores6@espe.edu.ec
Significance: 2 %

Sources included in the report:

Tesis Capelo-Reina.pdf (D29673025)
20171020 TITULACION_LOPEZ-PEREZ_-PUMA-VASQUEZ.pdf (D31591405)
TESIS MENESES-TORRES.pdf (D73691948)
<http://repositorio.tecnm.mx:8080/jspui/bitstream/123456789/111/1/Tesis.pdf>
<https://docplayer.es/61316687-Republica-bolivariana-de-venezuela-ministerio-de-educacion-universidad-rafael-urdaneta-facultad-de-ingenieria-escuela-de-ingenieria-quimica.html>
http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2705_C.pdf

Instances where selected sources appear:

8



EDGAR RICARDO
URROZIA GOYES



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE PETROQUÍMICA

Responsabilidad de autoría

Yo, **Flores Pinto, Jonathan Paúl**, con cédula de ciudadanía N° **172381939-5**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de Unidad de Integración Curricular: **“DISEÑO DE ASFALTOS MODIFICADOS COMO BASE PARA EL DESARROLLO DE LÁMINAS ASFÁLTICAS IMPERMEABILIZANTES A PARTIR DE TERFTALATO DE POLIETILENO RECICLADO Y ASFALTO AC-20”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 13 de abril de 2021

Flores Pinto, Jonathan Paúl

C.C.: 172381939-5



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE PETROQUÍMICA

Autorización de publicación

Yo, **Flores Pinto, Jonathan Paúl**, con cédula de ciudadanía N° **172381939-5**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de Unidad de Integración Curricular: **“DISEÑO DE ASFALTOS MODIFICADOS COMO BASE PARA EL DESARROLLO DE LÁMINAS ASFÁLTICAS IMPERMEABILIZANTES A PARTIR DE TERFTALATO DE POLIETILENO RECICLADO Y ASFALTO AC-20”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Latacunga, 13 de abril de 2021

Una firma manuscrita en tinta azul que parece ser la del autor, Jonathan Paúl Flores Pinto.

Flores Pinto, Jonathan Paúl

C.C.: 172381939-5

Dedicatoria

Esta nueva meta alcanzada en mi vida se la dedico a mi abuelito César Vitaliano Pinto quién me enseñó que con esfuerzo y haciendo siempre lo correcto todo es posible, desde el cielo me ha acompañado y guiado en cada paso de mi vida.

A mi madre, Norma Pinto, por ser un pilar fundamental en mi vida, siendo también una fuente de inspiración, nunca dejarme de apoyar, darme ánimos en los momentos que más lo necesité y enseñarme que sin importar los golpes que nos de la vida depende de uno mismo levantarse y seguir luchando o dejarse caer.

A mis hermanos, Danny y Andrés, que a pesar de tener nuestras diferencias siempre me ofrecieron su ayuda incondicional y cuidar de mi madre y abuelita en mi ausencia, demostrar que la familia es primero.

A mi padre, Roberto Flores, quien a pesar de la distancia me enseñó que todo esfuerzo tarde o temprano tiene su recompensa y seguirme capacitando para ser un mejor profesional y persona.

A mis abuelitas, Emperatriz y Marina, que siempre estuvieron pendientes de mí.

A Ericka Peñaloza, quien se convirtió en una parte fundamental de mi vida, me ayuda continuamente a ser mejor persona y me motivo para seguirme superando como profesional.

A toda mi familia, tíos, primos, primas, sobrino y demás familiares por confiar en mí, estar presentes en los buenos y malos momentos, darme un consejo y su apoyo.

Se lo dedico también a todas las personas que me acompañaron en este extenso, desgastante y a la vez gratificante recorrido.

Agradecimiento

Al estado ecuatoriano por permitirme formar como profesional en la mejor institución de educación superior.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga por aceptarme como alumno de la carrera de Ingeniería Petroquímica y aprender de magníficos docentes que han aportado de manera positiva en mi formación profesional.

A mi tutor Ricardo Urrutia Goyes, PhD por haberme guiado e instruido con su experiencia y conocimiento en todo el desarrollo de este trabajo.

A la empresa Imptek-Chova del Ecuador, en especial al departamento de Investigación, Desarrollo y Calidad, por brindarme la oportunidad de aprender, aplicar y consolidar mi conocimiento, a la vez desarrollar mi tesis de manera paulatina con mis funciones encomendadas.

A la ingeniera Sandra Villacís quien me apoyo para la elaboración del presente trabajo y apporto con su amplio conocimiento. A mis compañeros Valeria, Wilfrido, Juan y Steven por enseñarme y brindarme soporte en mi estancia como pasante.

Tabla de contenidos	
Carátula.....	1
Certificación.....	2
Análisis Urkund	3
Responsabilidad de autoría	4
Autorización de publicación	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento	7
Tabla de contenidos	8
Índice de tablas	10
Índice de figuras.....	11
Resumen.....	12
Abstract.....	13
Introducción.....	14
Antecedentes	14
Planteamiento del problema	18
Justificación e importancia.....	20
Objetivos	22
<i>Objetivo general</i>	22
<i>Objetivos específicos.....</i>	22
Fundamentación teórica	23
El petróleo	23
Fraccionamiento del crudo	24
Asfalto	25
Asfalto modificado.....	26
Polímeros	27
Tereftalato de polietileno.....	28
Propiedades físico-químicas.....	28
Metodología	30
Ubicación.....	30
Caracterización de la materia prima	31
Determinación de condiciones de homogenización	31

Dispersión del Tereftalato de Polietileno reciclado.....	32
Modificación con los demás porcentajes.....	32
Caracterización de los asfaltos modificados.....	33
Análisis.....	33
Resultados y discusión.....	34
Caracterización del Asfalto.....	34
Condiciones de modificación.....	35
Dispersión del PET reciclado.....	38
Caracterización del asfalto modificado.....	40
<i>Asfalto modificado con el 1% de PET reciclado</i>	40
<i>Asfalto modificado con el 3% de PET reciclado</i>	40
<i>Asfalto modificado con el 5% de PET reciclado</i>	41
<i>Asfalto modificado con el 7% de PET reciclado</i>	43
Comparativo de las propiedades con la normativa NTE INEN 2137:98.....	44
Comparativos entre el asfalto inicial y los modificados.....	45
<i>Penetración</i>	45
<i>Punto de reblandecimiento</i>	46
<i>Punto de inflamación</i>	47
<i>Recuperación elástica</i>	48
<i>Viscosidad a 135 °C</i>	49
<i>Pérdida por calentamiento</i>	50
Conclusiones y recomendaciones.....	51
Conclusiones.....	51
Recomendaciones.....	53
Bibliografía.....	54
Anexos.....	56

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Ensayos realizados para caracterizar el asfalto y asfaltos modificados con su respectiva normativa aplicada.....</i>	15
Tabla 2 <i>Polímeros más utilizados junto con su año de desarrollo e inventor.....</i>	19
Tabla 3 <i>Composición aproximada del petróleo.....</i>	23
Tabla 4 <i>Condiciones de operación.....</i>	32
Tabla 5 <i>Propiedades físico-químicas del asfalto inicial y asfaltos modificados.</i>	33
Tabla 6 <i>Propiedades físico-químicas obtenidas del Asfalto como base para el presente estudio.....</i>	34
Tabla 7 <i>Discos utilizados y resultados de ensayos para determinar de compatibilidad del PET con el Asfalto.....</i>	35
Tabla 8 <i>Resultados de compatibilidad con sus respectivas condiciones de homogenización.</i>	37
Tabla 9 <i>Polimerización del 1% de Tereftalato de Polietileno reciclado en el asfalto AC-20</i>	38
Tabla 10 <i>Propiedades físico-químicas del asfalto modificado con el 1% de PET reciclado.....</i>	40
Tabla 11 <i>Propiedades físico-químicas del asfalto modificado con el 3% de PET reciclado.....</i>	41
Tabla 12 <i>Propiedades físico-químicas del asfalto modificado con el 5% de PET reciclado.....</i>	42
Tabla 13 <i>Propiedades físico-químicas del asfalto modificado con el 7% de PET reciclado.....</i>	43
Tabla 14 <i>Comparativo de las propiedades físico-químicas de los asfaltos modificados con PET reciclado y los requisitos establecidos por la normativa NTE INEN 2137:98</i>	44

Índice de figuras

Figura 1 <i>Pellet de Tereftalato de Polietileno (PET) de Enkador.</i>	17
Figura 2 <i>Dispersión del polímero SBS en Asfalto con aumento de x100.</i>	18
Figura 3 <i>Principales productos derivados del petróleo con número de carbonos y rangos de ebullición.</i>	25
Figura 4 <i>Ubicación de la planta Imptek-Chova del Ecuador.</i>	30
Figura 5 <i>Porcentaje de PET reciclado en la mezcla vs penetración (dmm).</i>	45
Figura 6 <i>Porcentaje de PET reciclado en la mezcla vs punto de reblandecimiento (°C)</i>	46
Figura 7 <i>Porcentaje de PET reciclado en la mezcla vs punto de inflamación (°C)</i> .	47
Figura 8 <i>Porcentaje de PET reciclado en la mezcla vs Recuperación elástica (%)</i>	48
Figura 9 <i>Porcentaje de PET reciclado en la mezcla vs Viscosidad a 135 °C (cP)</i> ..	49
Figura 10 <i>Porcentaje de PET reciclado en la mezcla vs pérdida por calentamiento (%)</i>	50

Resumen

En esta investigación, se analiza la viabilidad de usar Tereftalato de polietileno (PET) reciclado, distribuido por Enkador, como material modificante del Asfalto, proveniente de la Refinería de Esmeraldas, para ser utilizado como base para el desarrollo de láminas asfálticas impermeabilizantes. Se propone realizar la modificación del asfalto por el método húmedo el cual se basa en la mezcla de los materiales a altas temperaturas para modificar el asfalto inicial y cumplir con rangos de propiedades físico-químicas especificados por las normativas UNE 104232: Parte 2 y en la NTE INEN 2137:98. Inicialmente se requiere la caracterización y clasificación del asfalto utilizado como base de las modificaciones. A continuación, se determina las condiciones óptimas de homogenización con el fin de asegurar la compatibilidad entre el 1% del material modificante y el asfalto. Posteriormente se realiza mediante microscopia de la mezcla asfáltica para asegurar la correcta dispersión del polímero en el asfalto. A continuación, se replican las condiciones de operación para incorporar el 1, 3, 5 y 7% de PET reciclado, respectivamente. A continuación, se realiza ensayos para determinar las propiedades físico-químicas de las mezclas modificadas, como penetración, punto de reblandecimiento, densidad, viscosidad, recuperación elástica, pérdida por calentamiento y punto de inflamación. Los ensayos se los realizan con el aval de normativas nacionales e internacionales como lo son American Society of Testing Materials (ASTM), Asociación Española de Normalización y Certificación (UNE) y/o Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN).

PALABRAS CLAVE:

- **TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET)**
- **ASFALTO**
- **ASFALTO MODIFICADO**
- **PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS**
- **LÁMINAS IMPERMEABILIZANTES**

Abstract

In this research, the feasibility of using recycled polyethylene terephthalate (PET), distributed by Enkador, as a modifying material for Asphalt, from the Esmeraldas Refinery, to be used as a basis for the development of waterproofing asphalt sheets is analyzed. It is proposed to modify the asphalt by the wet method which is based on the mixture of materials at high temperatures to modify the initial asphalt and comply with ranges of physical-chemical properties specified by the regulations UNE 104232: Part 2 and in the NTE IN EN 2137: 98. Initially, the characterization of the asphalt used as a base is required. Next, it is necessary to guarantee optimal homogenization conditions in order to ensure compatibility between the modifying material and the asphalt. Subsequently, microscopy of the asphalt mixture is performed to ensure the correct dispersion of the polymer in the asphalt. Tests are then carried out to determine the physical-chemical properties of the modified mixtures, such as penetration, softening point, density, viscosity, elastic recovery, loss on heating and flash point. The tests are carried out with the endorsement of national and international regulations such as the American Society of Testing Materials (ASTM), the Spanish Association for Standardization and Certification (UNE) and / or the Ecuadorian Standardization Service (INEN).

KEYWORDS:

- **POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET)**
- **ASPHALT**
- **MODIFIED ASPHALT**
- **PHYSICAL-CHEMICAL PROPERTIES**
- **WATERPROOFING SHEETS**

Capítulo I

1. Introducción

1.1. Antecedentes

El tereftalato de polietileno (PET) es un polímero producto de la policondensación entre el ácido tereftálico y el etilenglicol realizado por primera vez en 1941. Desde su primera producción ha tenido un crecimiento exponencial tanto de consumo como de manufactura y cuenta con una amplia variedad de usos entre los cuales sobresale la fabricación de envases de bebidas y textiles. El PET es un termoplástico que cuenta con excelentes propiedades, las cuales son requeridas en los envases de la industria alimenticia por su alto grado de cristalinidad, y su bajo costo de fabricación, razones por las cuales es uno de los materiales más utilizados a nivel mundial. La producción mundial del PET es de alrededor de 300 millones de toneladas anuales, pero lastimosamente ha sido considerado como un material de un solo uso que, junto con su lenta biodegradación ha generado que se convierta en un material altamente contaminante. A pesar de que existen plantas recicladoras, la mayoría de PET producido no es reciclado. (Ji, 2013; Ravindranath & Mashelkar, 1986)

El asfalto es un derivado del petróleo, que se caracteriza por ser la fracción más pesada del crudo, teniendo un alto punto de ebullición. Su uso se remonta hace más de 500 años para la construcción de carreteras y con el transcurso del tiempo y nuevas necesidades se lo ha utilizado como ligante para la fabricación de láminas de impermeabilización. La clasificación del asfalto es un indicador de sus características y posibles usos. En el Ecuador se la realiza mediante la normativa NTE INEN 2515:2010 (Anexo A), la cual incluye rangos de valores para las propiedades físico-químicas como: penetración, viscosidad a 60 y 135°C, respectivamente, y punto de inflamación. Los ensayos para determinar las propiedades físico-químicas del asfalto proveniente de la Refinería de Esmeraldas se los realizara con el aval de normativas nacionales e internacionales como American Society of Testing Materials (ASTM), Asociación Española de Normalización y Certificación (UNE) y/o Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN). Las normativas aplicadas para cada ensayo se encuentran en la Tabla 1 (Fahim et al., 2009; Speight, 2016; Wess, 2004).

Tabla 1

Ensayos realizados para caracterizar el asfalto y asfaltos modificados con su respectiva normativa aplicada

ENSAYO	NORMATIVAS	ANEXO
Requisitos. Productos derivados del petróleo. Cemento asfáltico (Clasificación por viscosidad)	NTE INEN 2515:2010	A
Requisitos. Impermeabilizantes	UNE 104232: Parte 2 NTE INEN 2137:98	B C
Penetración	ASTM D5/D5M-20 UNE 104281/1-5 NTE INEN 917:2013	D E F
Punto de Reblandecimiento (Anillo y Bola)	ASTM D36/D36M-14 UNE-EN 1427:2015 NTE INEN 920:2013	G H I
Punto de Inflamación	ASTM D92-18 UNE-EN ISO 2592:2018 INEN 808:2013	J K L

ENSAYO	NORMATIVAS	ANEXO
Recuperación Elástica	IRAM 6830	M
Viscosidad a altas temperaturas	ASTM D4402	N
	ASTM D6	O
Pérdida por calentamiento	UNE-EN 13303:2018	P
	NTE INEN 924:2013	Q

Nota. De las normativas INEN se incluirá únicamente la portada y página donde se encuentre la tabla o valor utilizado. Por políticas de privacidad de las normativas ASTM y UNE se encuentra únicamente un extracto.

Un material modificante de asfalto por lo general es un polímero que, al ser sometido a condiciones específicas, como: la temperatura y velocidad a la cual se adiciona el polímero, rango de temperatura, velocidad de agitación, tipo de disco y tiempo de mezclado, logra dispersarse en el asfalto y aportar con sus propiedades características a la mezcla llamada asfalto modificado. El tereftalato de polietileno (PET) reciclado proveniente de la empresa Enkador es el material modificante de este estudio. Enkador se dedica a la producción de PET reciclado, y está ubicada en el barrio Selva Alegre del cantón Rumiñahui. El proceso de reciclaje empieza con la recolección de botellas plásticas, carpetas y tapas de botellas fabricadas a partir de PET. Posterior a su recolección se realiza el triturado en el cual se disminuye el tamaño de las partículas para luego limpiarlo al vacío y separarlo de los demás componentes, una vez separado el PET de las impurezas se realiza el secado y la formación de pellet de PET, como se observa en la Figura 1, con un alto grado de pureza conocido también como grado alimenticio y es entregado con su respectiva ficha técnica (Anexo R). Con el fin de generar un producto ecológico que pueda ser utilizado como base para el desarrollo de láminas asfálticas impermeabilizantes, convirtiéndose en una alternativa para el sector de la construcción y así disminuir la cantidad de PET desechado al ecosistema. La modificación de los asfaltos es un tema muy amplio y el presente análisis busca adicionar algunas características del PET al asfalto como: su resistencia a los gases, humedad y dureza. La adición de ciertas características del PET podría evitar la oxidación del asfalto y beneficiar en

sus propiedades impermeabilizantes, su alta rigidez y dureza aumentaría el punto de reblandecimiento y sería más resistente a elevadas temperaturas, y su estabilidad a la intemperie aumentaría la vida útil del producto.(Hunter et al., 2015; McNally, 2011; Robinson, 2005)

Figura 1

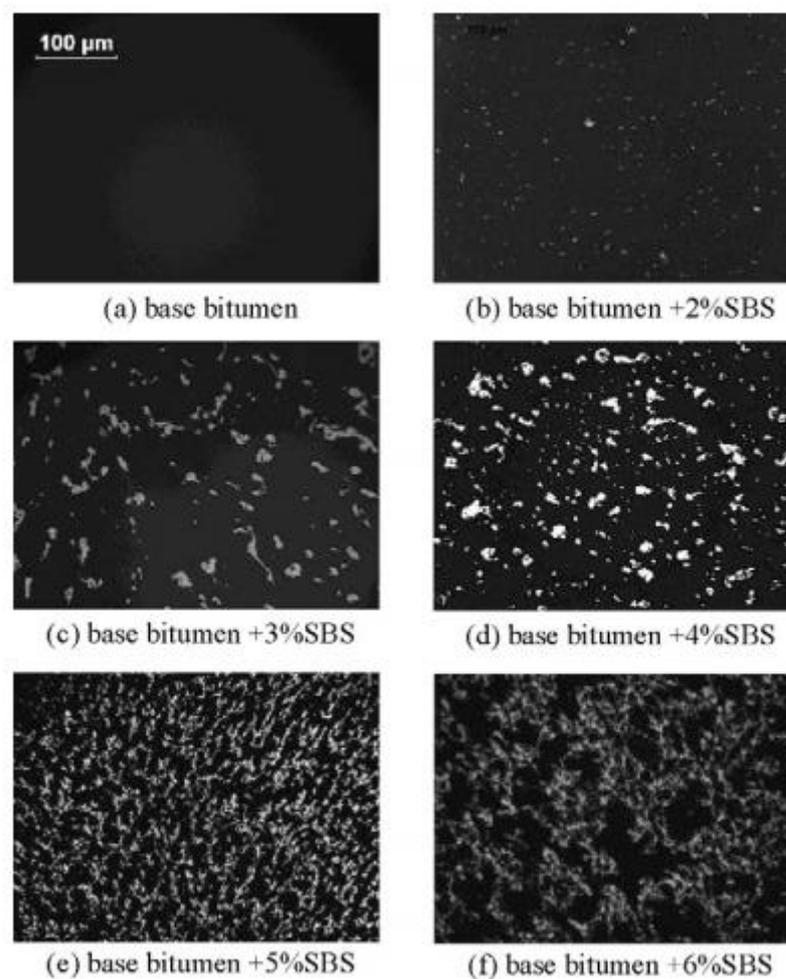
Pellet de Tereftalato de Polietileno (PET) de Enkador.



La modificación del asfalto puede ser de dos tipos de procesos: proceso por vía seca y proceso por vía húmeda. En el proceso por vía húmeda el material modificante se lo adiciona cuando el asfalto está caliente y por medio de agitación se realiza la incorporación al asfalto, y por vía seca en la cual el material modificante es incorporado con el agregado pétreo antes de mezclarse con el asfalto, este método es empleado en el sector vial. En el presente estudio la modificación es por vía húmeda ya que se requiere que las propiedades físico-químicas del asfalto modificado cumpla con los rangos establecidos en las normativas UNE 104232: Parte 2 (Anexo B) y en la NTE INEN 2137:98 (Anexo C). Las variables de operación son estrictamente controladas para garantizar una correcta dispersión del polímero y exista compatibilidad entre el PET y el asfalto. La correcta modificación del asfalto con un polímero se lo garantiza mediante microscopia en la cual se debe observar la malla formada por el polímero en el asfalto, como se puede ver en la Figura 2. Las propiedades del asfalto modificado son diferentes a las del asfalto inicial.(Chanda, 2013; McNally, 2011; Ravve, 2013; Young & Lovell, 2011)

Figura 2

Dispersión del polímero SBS en Asfalto con aumento de x100.



Nota. En el gráfico se observa la correcta dispersión de diferentes cantidades de un polímero SBS en el asfalto. Tomado de *Analysis of styrene-butadiene-styrene polymer modified bitumen using fluorescent microscopy and conventional test methods. Journal of Hazardous Materials*, por Sengoz, B., & Isikyakar, G., 2008, Elsevier.

1.2. Planteamiento del problema

Los polímeros tienen excelentes propiedades mecánicas, baja densidad, durabilidad y bajo costo, ha facilitado la vida cotidiana. Su aplicación es tan amplia que va desde un simple embalaje hasta la construcción pesada, desempeñando un

papel crucial para el desarrollo y mejora de la calidad de vida. Lamentablemente, representa un peligro para los ecosistemas, debido a su poca biodegradabilidad y crecimiento continuo de producción. La producción global de polímeros ascendió a 335 millones de toneladas en el 2016, y sigue en ascenso (Rudnik, 2019).

La constante renovación de productos químicos sintéticos y las capacidades de ingeniería de la producción a gran escala han conseguido que los plásticos se encuentren entre los materiales más utilizados en la época. Desde la década de 1800 se intentaron desarrollar diversos polímeros sintéticos, pero en ese tiempo los materiales desarrollados eran demasiado quebradizos por lo que no eran comercialmente viables. El primer polímero sintético que consiguió una gran producción en masa fue la resina fenol-formaldehído también conocida como baquelita en el año de 1909 por el químico Leo Baekeland. Las formas que conocemos en la actualidad se desarrollaron en la década de 1930 por diferentes científicos como se puede observar en la Tabla 2. Los polímeros se procesan con una amplia variedad de aditivos químicos. Estos aditivos son utilizados para ajustar las propiedades, definir estructura y desempeño del material que se quiere producir. Se espera que la industria del plástico sea un eje fundamental para la innovación en nanotecnología. Se estimaba que para el 2020, en EE.UU. la proporción de nanocompuestos entre los plásticos sería del 7% (Wagner & Lambert, 2018).

Tabla 2

Polímeros más utilizados junto con su año de desarrollo e inventor.

Año	Polímero	Inventor
1839	Caucho natural látex	Charles Goodyear
1839	Poliestireno	Eduard Simon
1909	Baquelita	Leo Hendrik Baekeland
1926	Policloruro de vinilo	Walter Semon
1935	Polietileno de baja densidad	Reginald Gibson y Eric Fawcett
1937	Poliuretano	Otto Bayer y colaboradores
1938	Tereftalato de polietileno	John Whinfield y James Dickson

Año	Polímero	Inventor
1951	Polietileno de alta densidad	Paul Hogan y Robert Banks
1951	Polipropileno	Paul Hogan y Robert Banks
1978	Polietileno de baja densidad lineal	DuPont

Nota. (Wagner & Lambert, 2018)

El asfalto es la fracción con los componentes menos volátiles del crudo, a pesar de ser un fluido viscoso se lo ha utilizado desde hace más de 500 años para diferentes usos entre los cuales sobresalen el asfaltado de carreteras y elaboración de productos para la impermeabilización de construcciones ya sea como láminas o revestimientos. El asfalto de la Refinería de Esmeraldas tiene un punto de reblandecimiento de alrededor de 50°C por lo que al ser expuesto de manera directa a la radiación solar se ablanda. Las láminas para impermeabilización son expuestas a la radiación solar por lo que se requiere una modificación del asfalto y así poder ser utilizado como ligante en la fabricación de láminas asfálticas impermeabilizantes (Speight, 2016).

1.3. Justificación e importancia

Los polímeros han facilitado la vida cotidiana, ya que tienen excelentes propiedades lo que les hace útiles para solventar casi todas las necesidades, juntamente con su fácil y barata producción han generado que la sociedad se vuelva dependiente de los plásticos. El Tereftalato de polietileno (PET) es uno de los plásticos más producidos a nivel mundial, se lo utiliza en todo tipo de botellas de bebidas, juguetes y una amplia variedad de productos. La poca o nula biodegradabilidad que el PET presenta es la razón por la cual se ha convertido en una importante fuente de contaminación.

En los últimos años se ha visto un crecimiento de los “recicladores”, personas que se encargan de clasificar para luego vender desperdicios de otras personas. Sin embargo, la mayoría del PET utilizado termina siendo desechado en la basura común. A pesar de que existen empresas que se dedican al reprocesamiento del PET en el cual mediante un proceso lo vuelven útil para ser reutilizados, su costo es

superior en comparación al de generar PET virgen, ha hecho que las personas y empresas continúen utilizando el PET virgen, sin dar apertura al PET reciclado que tiene las mismas características que uno virgen.

El asfalto virgen proveniente de la Refinería de Esmeraldas debido a sus propiedades físico-químicas, no puede ser utilizado directamente para la fabricación de láminas asfálticas impermeabilizantes. El estudio de la modificación de asfaltos es un tema que ha tenido una creciente relevancia en el mundo de la construcción y la petroquímica. El material modificante, por lo general polímeros, como su nombre lo indica modifica ciertas características del asfalto virgen, existen diferentes tipos de modificación del asfalto, seco y húmedo.

La correcta modificación del asfalto podría generar una mezcla asfáltica que pueda ser utilizada como base para el desarrollo de láminas asfálticas impermeabilizantes. La utilización del PET reciclado puede generar una nueva alternativa ecológica para la modificación del asfalto, dándole un nuevo uso y así disminuir la cantidad que se desecha al ambiente.

1.4. Objetivos

1.4.1. *Objetivo general*

Diseñar asfaltos modificados como base para el desarrollo de láminas asfálticas impermeabilizantes a partir de tereftalato de polietileno reciclado y asfalto AC-20.

1.4.2. *Objetivos específicos*

- Determinar las propiedades físico-químicas del asfalto proveniente de la Refinería de Esmeraldas, mismo que será usado como base para el desarrollo de las mezclas.
- Determinar las condiciones óptimas de homogenización con el fin de asegurar la compatibilidad entre el 1% del material modificante y el asfalto.
- Determinar la correcta dispersión del 1% del material modificante en el asfalto, mediante microscopia de la mezcla asfáltica.
- Determinar las propiedades físico-químicas de los asfaltos modificados con el 1, 3, 5 y 7% de PET reciclado, a las condiciones previamente establecidas.
- Comparar las propiedades físico-químicas de las mezclas asfálticas y el asfalto inicial.
- Determinar la viabilidad técnica de utilizar el Tereftalato de polietileno (PET) reciclado como material modificante del asfalto, para ser usado como base para el desarrollo de láminas asfálticas impermeabilizantes.

Capítulo II

2. Fundamentación teórica

2.1. El petróleo

El petróleo se genera a partir de la descomposición de materia orgánica durante milenios. Es un componente que puede tener diferentes colores, viscosidad, olor y estado en su forma natural. Los hidrocarburos son los componentes que están en mayor cantidad en el petróleo sin embargo también existen pequeñas cantidades de otros compuestos como lo son los nitrogenados, sulfatados, oxigenados y que contienen metales. Por lo general al petróleo se lo puede relacionar con sus cuatro fracciones referenciales las cuales se conocen como saturados, aromáticos, resinas y asfáltenos. Sin embargo estas fracciones no son todos los componentes químicos que existen en las fracciones, sin embargo están relacionados con características generales del petróleo (Speight, 1997).

El petróleo es un líquido que puede ser de diferentes coloraciones y tonalidades. El aspecto, color y olor son diferentes y dependen de las condiciones a las cuales la materia orgánica procedente fue sometida. El petróleo es una mezcla de hidrocarburos entre los cuales hay: hidrocarburos saturados que se los conoce como parafinas, hidrocarburos conocidos como nafteno y compuestos de la serie del benzol (Newbery et al., 2007).

El petróleo es la materia prima de la industria de la refinación, es una mezcla compleja de hidrocarburos y en un pequeño porcentaje de otros elementos como azufre, nitrógeno y metales que se integran a los hidrocarburos; su composición aproximada puede verse en la Tabla 3 (Urpí, 2012).

Tabla 3

Composición aproximada del petróleo.

CRUDOS	% peso
Carbono	84-87
Hidrógeno	11-14
Azufre	0-5
Nitrógeno	0-0.2

Nota. Tomado de *Urpí, J. L. (2012, p. 1).*

El petróleo es una mezcla extremadamente compleja de compuestos de base carbono e hidrógeno, generalmente también existen diminutas cantidades de nitrógeno, oxígeno, compuestos sulfurados y trazas de compuestos que contienen metales. El betún de arena es diferente al petróleo y dependiendo de su composición se define el método de refinación más adecuado (Speight & Ozum, 2001).

2.2 Fraccionamiento del crudo

El crudo de petróleo en su estado natural no tiene utilidad ni valor para los consumidores por lo que debe ser sometido a refinación para transformarlo en productos que puedan ser utilizados en el mercado. En la refinación existen diferentes tipos de procesos en los cuales se utilizan varios métodos físicos y químicos. Los catalizadores, la presión, el calor y los productos químicos se aplican bajo diseño de procesos, condiciones de operación y reacciones químicas muy variables para convertir el crudo en productos derivados del petróleo (Gary et al., 2007).

En el refino del crudo de petróleo, el crudo es sometido a una amplia cantidad de operaciones unitarias físicas y químicas que generan una gran variedad de productos. Entre los procesos más utilizados sobresale la destilación, que es el más utilizado a nivel mundial y separa los componentes según su punto de ebullición. Seguido por el craqueo catalítico también conocido por sus siglas en inglés como FCC. Las materias primas se pueden definir en termino de cuatro fracciones generales: asfáltenos, resinas, saturados y aromáticos (Speight & Ozum, 2001).

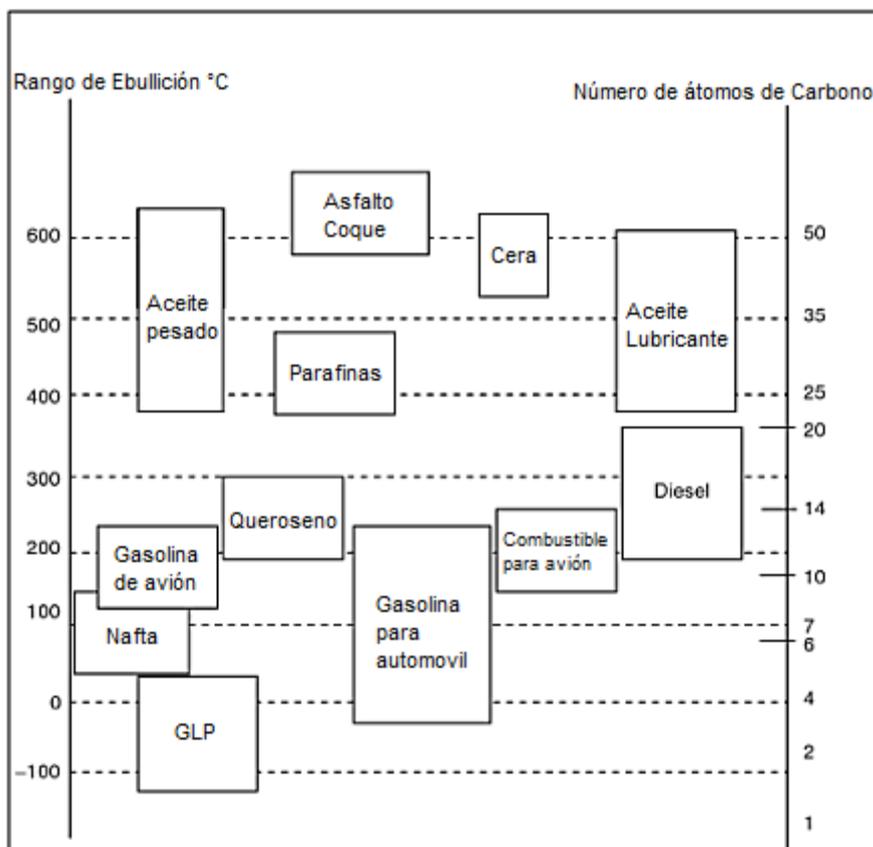
La refinación del petróleo es fundamental en nuestras vidas. La mayor cantidad de medios de transporte utilizados funcionan de diferentes productos derivados del crudo de petróleo. El craqueo catalítico fluidizado (FCC) es el proceso principal para la producción de gasolina. El catalizador por lo general es a base de zeolita misma que se encarga del craqueo. La materia prima de FCC es el crudo y su principal producto la gasolina, además se produce gasóleo, gases volátiles y otros derivados de uso cotidiano (Fahim et al., 2009).

El método tradicional para la separación del crudo en sus diferentes cortes es mediante la destilación, la separación de sus componentes es por su punto de ebullición como se observa en la Figura 3. A pesar de que esta técnica se ha practicado mucho, es muy limitada para crudos pesados, aun así, sigue siendo la

operación más importante en las refinerías. El crudo se vaporiza parcial o totalmente en un horno y luego se alimenta al fondo del destilador atmosférico (Speight, 1997).

Figura 3

Principales productos derivados del petróleo con número de carbonos y rangos de ebullición.



Nota. El gráfico representa los diferentes cortes del crudo. Tomado de Fahim et al. (2009).

2.3 Asfalto

El asfalto es utilizado en gran medida en el sector de la construcción de vías, lo que los hace un producto importante de la refinación. Comprende hasta el 20% de los productos de la refinación, se produce únicamente a partir del material asfáltico que contiene el crudo del cual proviene (Fahim et al., 2009).

El asfalto es producto de una operación de refinería, al residuo de la columna de destilación se lo trata mediante soplado de aire o con un solvente para generar un producto que cumpla con las especificaciones para la fabricación de carreteras y otros usos. El asfalto se usó por primera vez hace aproximadamente 500 años cuando se identificó su utilizad en sellado, impermeabilización, adhesivos para joyería y como masilla en el sector de la construcción (Speight, 2016).

La mayor utilización de los asfaltos es para la pavimentación y para la impermeabilización de techos. A partir del asfalto se hacen revestimientos líquidos que sirven para prevenir la corrosión de metales; revestimiento de canales de riego, embalses y obras de defensa marítima; adhesivos en laminados eléctricos; y como base para césped sintético. En Estados Unidos, aproximadamente 350 000 trabajadores se relacionan directamente con el asfalto entre los cuales el 85.71% se dedican a instalaciones de mezcla en caliente y sitios de pavimentación y el resto en la manufactura de techado de asfalto (Wess, 2004).

2.4 Asfalto modificado

La modificación del asfalto con polímero se utiliza principalmente para la construcción de carreteras. Los asfaltos modificados disminuyen el desgaste ocasionado por el flujo vehicular, adicionalmente retienen la textura de la superficie a diferentes cargas de tráfico, disminuyendo de esta manera los accidentes por deslizamiento y aumentando su vida útil en comparación de un asfalto sin modificar (Robinson, 2005).

Mezclar dos o más materiales para formar un solo producto que tenga las propiedades de los materiales que lo constituyen se lo ha venido realizando desde mucho tiempo atrás. Las propiedades mecánicas, químicas, eléctricas y muchas otras están determinadas por el producto resultante y las condiciones a las cuales se realizaron el mezclado. El asfalto o también conocido como betún es una fracción importante del crudo a pesar de su bajo costo en comparación a las fracciones o cortes más livianos. El asfalto encuentra muchas aplicaciones como material de construcción e ingeniería; sin embargo, tiene malas propiedades mecánicas ya que es duro y quebradizo en ambiente frío y blando y fluido en ambientes cálidos. La manera más común de modificar el asfalto para mejorar las propiedades es mezclándolo con polímeros sintéticos (McNally, 2011).

Los asfaltos modificados tienen propiedades diferentes a las del asfalto virgen del cual provienen, este cambio se debe por el agente químico adicionado que altera su estructura química, propiedades físicas y/o mecánicas. El material modificante por lo general es un polímero sintético y su transmisión de las propiedades al asfalto con el cual es mezclado determina muchos aspectos del comportamiento de la carretera, en particular la resistencia a la deformación y al agrietamiento (Hunter et al., 2015).

2.5 Polímeros

La existencia de los polímeros es desde que comenzó la vida, estos son polímeros naturales como el ADN, las proteínas y polisacáridos, mismos que juegan un papel crucial en el desarrollo de la vida. Desde los tiempos más remotos el hombre ha explotado polímeros naturales para satisfacer diferentes necesidades entre las cuales sobresalen la fabricación de ropa, decoración herramientas y abrigo. Sin embargo se conoce como el origen de la industria de los polímeros al siglo XIX cuando se realizaron avances significativos sobre la modificación de ciertos polímeros naturales (Young & Lovell, 2011).

La palabra polímero proviene de raíces griegas poli que significa muchos y meros que significa parte por lo que la palabra polímero significa “muchas partes”. Se designa como una macromolécula formada por muchas partes de una unidad repetida llamada monómero. Los polímeros contienen millones de átomos entrelazados entre sí, las características del polímero depende las características de los monómeros que lo conforman (Chanda, 2013).

El polímero se entiende como una macromolécula compuesta por varias partes llamados monómeros, por lo general los enlaces que los unen son enlaces covalentes. Estas unidades se pueden conectar entre sí de diferentes maneras, dependiendo la funcionalidad del monómero pueden ser lineales o llegar a ser polímeros con ramificaciones muy complejas (Ravve, 2013).

2.6 Tereftalato de polietileno

El tereftalato de polietileno (PET) se lo puede encontrar en diferentes presentaciones como termoplástico amorfo y semicristalino. Se caracteriza por tener buena resistencia a aceites minerales, solventes y ácidos, pero no a las bases. El PET semicristalino tiene buena resistencia, ductilidad, rigidez y dureza, mientras que el PET amorfo tiene mejor ductilidad. El PET también tiene una excelente capacidad de proceso y se puede reciclar para diferentes aplicaciones. (Ji, 2013)

El tereftalato de polietileno (PET) es un polímero muy utilizado en forma de fibras, películas y como material de moldeo. El PET capta el cuarenta por ciento de la demanda mundial de fibras sintéticas, sus excelentes características y bajo costo de producción lo han hecho un material muy rentable (Ravindranath & Mashelkar, 1986).

2.7 Propiedades físico-químicas

Las principales diferencias entre el comportamiento de los componentes químicos en el medio ambiente son atribuibles a sus propiedades físico-químicas. Las propiedades clave dependen del uso para el cual es fabricado el producto. Otros descriptores moleculares esenciales son la masa molecular y el volumen molar, siendo ocasionalmente útiles para fines específicos ciertas propiedades como temperatura y presión crítica y área molecular (Mackay et al., 1997).

Penetración, es la consistencia de un material bituminoso expresado como la distancia, en décimas de milímetro, que una aguja estándar penetra verticalmente una muestra del material, bajo condiciones conocidas de tiempo, carga y temperatura (Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN], 2013).

Punto de reblandecimiento, es la temperatura a la que una sustancia se reblandece y se estira con un peso determinado y fluye verticalmente hacia abajo en una sustancia definida (INEN, 2013).

Punto de inflamación, en los productos derivados del petróleo, es la temperatura más baja corregida a una presión barométrica de 101.3 kPa (760 mmHg), a la cual la aplicación de una fuente de ignición, causa la inflamación de los vapores de la muestra bajo condiciones específicas de ensayo (INEN, 2013).

Recuperación elástica, es la capacidad que tiene un material bituminoso para recuperar su forma inicial luego de ser ejercida una fuerza externa que genera torsión (Norma argentina [IRAM], 2011).

Viscosidad a altas temperaturas, es la resistencia que tiene un material bituminoso a ser desplazado a diferentes temperaturas.

Perdida por calentamiento, es la determinación de la pérdida de masa (excluyendo el contenido de agua) de aceites y compuestos asfálticos al ser sometidos a calentamiento (INEN, 2013).

Capítulo III

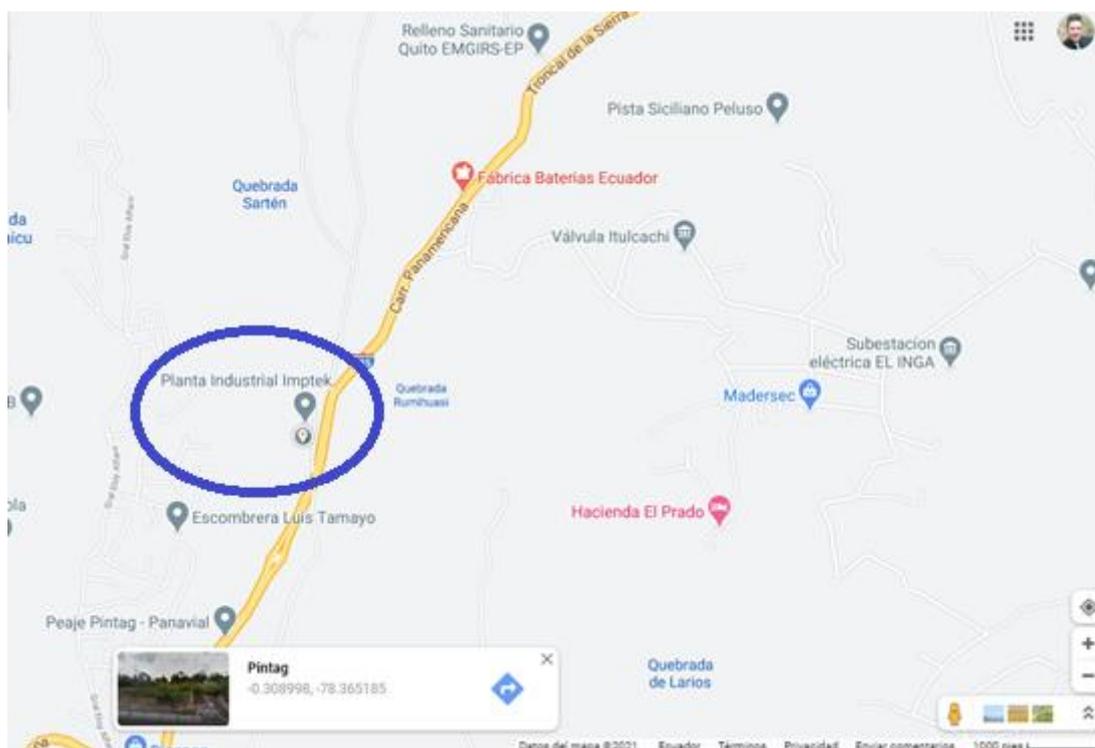
3 Metodología

3.1. Ubicación

El laboratorio de Investigación, Desarrollo y Calidad de Imptek donde se realizó la presente investigación se encuentra en la planta Imptek-Chova del Ecuador, ubicada en el kilómetro 14 de la vía E-35, sector “El Inga” en la ciudad de Quito en Ecuador como se puede observar en la Figura 4.

Figura 4

Ubicación de la planta Imptek-Chova del Ecuador.



Nota. En la figura se observa la ubicación exacta de la planta Imptek-Chova del Ecuador. Tomado de *Google maps*.

3.2 Caracterización de la materia prima

Inicialmente se caracteriza la materia prima, el asfalto proveniente de la Refinería de Esmeraldas. Luego se realizan ensayos de las propiedades físico-químicas para determinar las condiciones de operación y adición a las cuales el asfalto es compatible con el Tereftalato de polietileno reciclado proveniente de Enkador. A continuación, se extraen muestras representativas para realizar la caracterización de cada una de las mezclas con el 1, 3, 5 y 7 % de PET reciclado respectivamente. Para esto, nuevamente se realizan ensayos de propiedades físico-químicas. Finalmente, se determina el porcentaje de PET con el cual el asfalto modificado cumple con los requerimientos propuestos por las normativas NTE INEN 2137:98 y UNE 104232: Parte 2.

En primer lugar se recibe el asfalto proveniente de la Refinería de Esmeraldas, mismo que es transportado y entregado por un tanquero en la planta IMPTEK, del cual se toma una muestra representativa para determinar propiedades físico-químicas del asfalto mediante los siguientes ensayos: Penetración, para el que se aplican las normativas: ASTM D5 (Anexo D), UNE 104281/1-5 (Anexo E) y NTE INEN 917:2013 (Anexo F), punto de reblandecimiento: ASTM D36 (Anexo G), UNE-EN 1427:2015 (Anexo H) y NTE INEN 920:2013 (Anexo I), densidad mediante el principio de Arquímedes en el cual se divide la peso de la masa en el aire para el peso de la misma masa en agua destilada a 25°C, punto de inflamación: ASTM D92 (Anexo J), UNE-EN ISO 2592:2018 (Anexo K) e INEN 88:2013 (Anexo L), recuperación elástica: IRAM 6830 (Anexo M) y viscosidad: ASTM D2196 (Anexo N) y NTE INEN 1013 (Anexo O).

3.3 Determinación de condiciones de homogenización

A continuación, se adiciona el material modificante, tereftalato de polietileno reciclado en el porcentaje establecido, 1%, a una temperatura determinada y se establecen condiciones de mezclado como: tipo de disco, velocidad del disco, rango de temperatura y tiempo de homogenización, para completar la información requerida en la Tabla 4. Posteriormente se determina la compatibilidad del asfalto AC-20 con el PET reciclado adicionado, verificando homogeneidad en la mezcla. Si existe separación de fases, las condiciones operación no fueron las adecuadas por

lo que existe incompatibilidad, lo que demandaría una modificación de las condiciones de operación y/o adición del polímero. Esta verificación se la realiza después de 24 horas.

Tabla 4

Condiciones de operación

Ensayo	Temperatura de adición del PET (°C)	Tipo de disco	Velocidad del disco (RPM)	Rango de temperatura de mezcla (°C)	Tiempo de mezclado (min)	Compatible
1						
2						
3						
4						

3.4 Dispersión del Tereftalato de Polietileno reciclado

A continuación se procede a verificar la correcta dispersión del 1% de Tereftalato de polietileno en el asfalto mediante microscopia, cada 40 minutos desde la adición del PET reciclado. Se requiere: extraer 3 gramos de la mezcla, calentar la espátula con la ayuda de un mechero, introducir la espátula de manera perpendicular a la superficie de la muestra, realizar el trazado de la mezcla caliente en un portaobjetos, colocar el cubre objetos y visualizar en el microscopio.

3.5 Modificación con los demás porcentajes

Posteriormente se replican las condiciones de operación, a las cuales el 1% de PET reciclado es compatible y se polimeriza en el asfalto AC-20. Se adiciona los porcentajes establecidos 1, 3, 5 y 7% de PET reciclado respectivamente.

3.6 Caracterización de los asfaltos modificados

Luego se procede a determinar las propiedades físicas y químicas del asfalto modificado mediante ensayos: Penetración para el que se aplican las normativas: ASTM D5 (Anexo D), UNE 104281/1-5 (Anexo E) y NTE INEN 917:2013 (Anexo F), punto de reblandecimiento: ASTM D36 (Anexo G), UNE-EN 1427:2015 (Anexo H) y NTE INEN 920:2013 (Anexo I), densidad mediante el principio de Arquímedes en el cual se divide la peso de la masa en el aire para el peso de la misma masa en agua a 25°C, punto de inflamación: ASTM D92 (Anexo J), UNE-EN ISO 2592:2018 (Anexo K) e INEN 88:2013 (Anexo L), recuperación elástica: IRAM 6830 (Anexo M), viscosidad: ASTM D2196 (Anexo N) y NTE INEN 1013 (Anexo O), perdida por calentamiento: ASTM D6 (Anexo P), UNE-EN 13303:2018 (Anexo Q) y NTE INEN 924:2013 (Anexo R) y contenido de cenizas: ASTM D482 (Anexo S), UNE 104281/1-7 (Anexo T) y NTE INEN 1492 (Anexo U) y escriben la Tabla 5.

Tabla 5

Propiedades físico-químicas del asfalto inicial y asfaltos modificados.

PRODUCTO							
FECHA				Viscosidad (cP)			
REBLANDECIMIENTO (°C)				Torque (%)			
PENETRACIÓN (dmm)				Velocidad (RPM)			
Densidad (g/ml)				Temperatura (°C)			
				Perdida por calentamiento (%)			
P. INFLAMACIÓN (°C)							
RECUPERACIÓN ELÁSTICA (%)				OBSERVACIONES			

3.7 Análisis

Finalmente se analizan los resultados de los ensayos realizados para cada uno de los tratamientos, y comparan las propiedades entre ellos y el asfalto AC-20 inicial. Se procede a comparar que los resultados de los ensayos cumplan con los requerimientos establecidos por las normativas UNE 104232: Parte 2 y/o NTE INEN 2137:98 para másticos de láminas impermeabilizantes.

Capítulo IV

4 Resultados y discusión

Todos los ensayos se los realizó en el laboratorio de Investigación, desarrollo y Calidad de Imptek-Chova del Ecuador.

4.1 Caracterización del Asfalto

Las propiedades físico-químicas de la Tabla 6 corresponden al asfalto recibido de la Refinería de Esmeraldas, mismo que es usado como base para el desarrollo del presente estudio. Según la Tabla 4 del Anexo A se clasifica como un AC-20.

Tabla 6

Propiedades físico-químicas obtenidas del Asfalto utilizado como base para el presente estudio.

PROPIEDAD	UNIDADES	VALOR
Punto de Reblandecimiento	°C	50.6
Penetración	dmm	62.67
Viscosidad (60 °C)	Pa*s	261.7
Viscosidad (135 °C)	mm^2s^{-1}	437.5
Punto de Inflamación	°C	242.7
Recuperación elástica inicial	%	7.78
Recuperación elástica final	%	9.72
Densidad	g/ml	0.9956

4.2 Condiciones de modificación

Para determinar las condiciones óptimas de modificación se partió a la temperatura de 150 °C a la cual llega el asfalto al mezclador. La modificación del asfalto en todos los casos se hizo con el 1% de tereftalato de polietileno (PET). La modificación se lo realizó con diferentes tipos de disco como se observa en la Tabla 7. Los resultados de los ensayos se encuentran en la Tabla 8.

Tabla 7

Discos utilizados y resultados de ensayos para determinar de compatibilidad del PET con el Asfalto.

Ensayo	Disco Utilizado	Resultado	Observación
1			Separación de fase. Se descarta tratamiento.
2			Separación de fase. Se descarta tratamiento.
3			No se incorpora todo el PET. Se descarta tratamiento

Ensayo	Disco Utilizado	Resultado	Observación
4			No se incorpora todo el PET. Se descarta tratamiento
5			No se incorpora todo el PET. Se descarta tratamiento
6			Homogeneidad. Se acepta tratamiento
7			Leve separación de fase a las 24 horas. Se descarta tratamiento

Nota. En el sexto tratamiento es el único en el que consigue la homogeneidad total de la muestra.

Tabla 8

Resultados de compatibilidad con sus respectivas condiciones de homogenización.

Ensayo	Temperatura de adición del PET (°C)	Tipo de disco	Velocidad del disco (RPM)	Rango de temperatura de mezcla (°C)	Tiempo de mezclado (min)	Compatible
1	150	Hoja abierta	72	190-200	120	No
2	150	Hoja abierta	72	170-180	120	No
3	150	Corte	1000	170-180	150	No
4	150	Corte	2500	190-200	150	No
5	150	Corte pequeño	5000	190-200	150	No
6	150	Cizallamiento	5000	170-180	150	Sí
7	150	Cizallamiento	5000	190-200	150	No

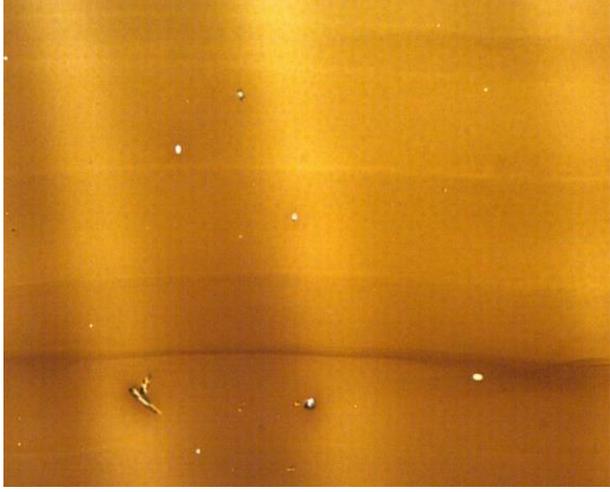
Nota. En negrilla se encuentran las condiciones de homogenización a las cuales el PET reciclado es compatible con el asfalto AC-20

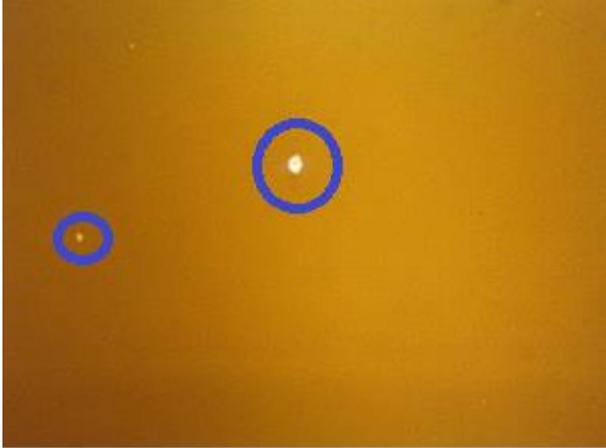
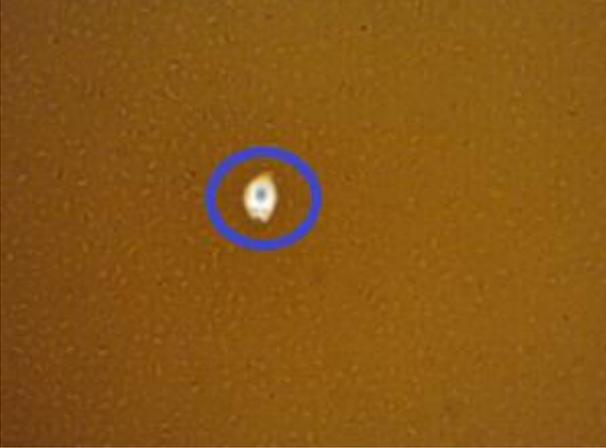
4.3 Dispersión del PET reciclado

Se aplicó microscopía para garantizar la polimerización del 1% de PET reciclado en el asfalto proveniente de la Refinería de Esmeraldas. En la Tabla 9 se aprecia la polimerización del PET reciclado cada 40 minutos de homogenización.

Tabla 9

Polimerización del 1% de Tereftalato de Polietileno reciclado en el asfalto AC-20

Tiempo (min)	Imagen	Observación
0		Asfalto puro
40		El PET reciclado comienza a dispersarse en el asfalto

Tiempo (min)	Imagen	Observación
80		La dispersión del polímero avanza sin embargo aún existe PET sin polimerizar
120		La dispersión del polímero es casi total sin embargo aún existen pequeñas cantidades de PET sin polimerizar
150		La dispersión del PET reciclado es homogénea en toda la muestra

4.4 Caracterización del asfalto modificado

Para las modificaciones con el 1, 3, 5 y 7% de PET reciclado, se replicaron las condiciones de operación a las cuales el 1% de PET es compatible con el asfalto AC-20. Sin embargo, para los porcentajes de 3, 5 y 7% no se obtuvo una compatibilidad total ya que se podía apreciar pequeñas cantidades de PET triturado, pero sin incorporarse, a pesar de modificar las propiedades físico-químicas del asfalto inicial.

4.4.1 Asfalto modificado con el 1% de PET reciclado

En la Tabla 10 se observan las propiedades físico-químicas del asfalto modificado con 1% de PET reciclado. El cambio en las propiedades físico-químicas en comparación al asfalto inicial se debe a la correcta dispersión del PET reciclado en el asfalto.

Tabla 10

Propiedades físico-químicas del asfalto modificado con el 1% de PET reciclado

PRODUCTO	Asfalto modificado con el 1% de PET reciclado								
FECHA	11/03/2021			Viscosidad (cP)	4417	2167	1150	642,9	402,5
REBLANDECIMIENTO (°C)	71,9	72,3	72,1	Torque (%)	26,5	26	27,6	22,5	16,1
PENETRACIÓN (dmm)	29/30/31=30			Velocidad (RPM)	30	60	120	175	200
Densidad (g/ml)	0,9922			Temperatura (°C)	125	135	145	155	165
	7,93	8,00	0,991	Perdida por calentamiento (%)	0,7285				
	8,42	8,54	0,993		50,02	3,50	53,16	0,7143	
	6,39	6,44	0,992		50,12	3,40	53,16	0,7251	
P. INFLAMACIÓN (°C)	238,3				50,06	3,70	53,39	0,7462	
RECUPERACIÓN ELÁSTICA (°)	12	16		OBSERVACIONES	Textura totalmente diferente al asfalto inicial				

4.4.2 Asfalto modificado con el 3% de PET reciclado

En la Tabla 11 se observan las propiedades físico-químicas del asfalto modificado con 3% de PET reciclado. Las condiciones de homogenización para garantizar la dispersión cambian en función del porcentaje utilizado.

Tabla 11

Propiedades físico-químicas del asfalto modificado con el 3% de PET reciclado.

PRODUCTO	Asfalto modificado con el 3% de PET reciclado								
FECHA	26/03/2021			Viscosidad (cP)	100	530	350	235	125
REBLANDECIMIENTO (°C)	55,1	56,1	55,6	Torque (%)	20	17,4	14	9,4	5
PENETRACIÓN (dmm)	60/60/61=60,33			Velocidad (RPM)	100	150	200	200	200
Densidad (g/ml)	0,9826			Temperatura (°C)	125	135	145	155	165
	6,08	6,19	0,982	Perdida por calentamiento (%)	0,2263				
	6,32	6,43	0,982		50,00	50,00	50,00	50,00	
	6,30	6,41	0,982		50,18	50,18	50,18	50,18	
P. INFLAMACIÓN (°C)	252,8				50,06	3,70	50,06	50,06	
RECUPERACIÓN ELÁSTICA (°)	15	17.		OBSERVACIONES	Textura semejante al asfalto inicial				

4.4.3 Asfalto modificado con el 5% de PET reciclado

En la Tabla 12 se observan las propiedades físico-químicas del asfalto modificado con 5% de PET reciclado. La textura semejante al asfalto inicial se debe a la poca modificación en las propiedades físico-químicas, existen pequeñas partículas de PET reciclado.

Tabla 12

Propiedades físico-químicas del asfalto modificado con el 5% de PET reciclado

PRODUCTO	Asfalto modificado con el 5% de PET reciclado								
FECHA	27/03/2021			Viscosidad (cP)	1420	806,7	510	347,5	247,5
REBLANDECIMIENTO (°C)	57,8	57,8	57,8	Torque (%)	28,4	24,2	20,4	13,9	9,9
PENETRACIÓN (dmm)	59/58/59=58,67			Velocidad (RPM)	100	150	200	200	200
Densidad (g/ml)	0,9783			Temperatura (°C)	125	135	145	155	165
	8,04	8,23	0,976	Perdida por calentamiento (%)	0,2940				
	8,15	8,33	0,978		50,05	3,30	53,19	0,3197	
	8,61	8,79	0,979		48,45	3,36	51,68	0,2683	
P. INFLAMACIÓN (°C)	257,2				50,12	3,42	53,69	0,2940	
RECUPERACIÓN ELÁSTICA (°)	15	17		OBSERVACIONES	Textura semejante al asfalto inicial con pequeñas partículas				

Nota. La textura del asfalto modificado es semejante a la del asfalto inicial sin embargo se observan pequeñas partículas.

4.4.4 Asfalto modificado con el 7% de PET reciclado

En la Tabla 13 se observan las propiedades físico-químicas del asfalto modificado con 5% de PET reciclado. Las partículas pequeñas son el PET reciclado que no logró dispersarse en el asfalto por eso las propiedades físico-químicas son semejantes a las del asfalto inicial.

Tabla 13

Propiedades físico-químicas del asfalto modificado con el 7% de PET reciclado

PRODUCTO	Asfalto modificado con el 7% de PET reciclado								
FECHA	27/03/2021			Viscosidad (cP)	2330	1340	837,5	572,5	407,5
REBLANDECIMIENTO (°C)	59,5	60,5	60	Torque (%)	46,6	40,2	33,5	22,9	16,3
PENETRACIÓN (dmm)	51/52/52=51,67			Velocidad (RPM)	100	150	200	200	200
Densidad (g/ml)	1,005			Temperatura (°C)	125	135	145	155	165
	7,84	7,81	1,004	Perdida por calentamiento (%)	0,2644				
	8,50	8,45	1,006		50,07	3,54	53,46	0,2996	
	8,56	8,52	1,005		50,03	3,40	53,31	0,2399	
P. INFLAMACIÓN (°C)	258,8				50,04	3,47	53,64	0,2538	
RECUPERACIÓN ELÁSTICA (°)	12	16		OBSERVACIONES	Textura semejante a la del asfalto inicial				

Nota. La textura es similar a la del asfalto inicial y se observa una gran cantidad de partículas pequeñas.

4.5 Comparativo de las propiedades de los asfaltos modificados con la normativa NTE INEN 2137:98

La normativa NTE INEN 2137:98 hace referencia a los requisitos de las propiedades físico-químicas que debe tener un asfalto modificado con polímero. Como se observa en la Tabla 14 ningún asfalto modificado con PET cumple con todas las especificaciones.

Tabla 14

Comparativo de las propiedades físico-químicas de los asfaltos modificados con PET reciclado y los requisitos establecidos por la normativa NTE INEN 2137:98

Requisitos	Unidad	NTE INEN 2137:2013		Asfalto modificado con PET reciclado			
		Mín.	Máx.	1 %	3 %	5 %	7 %
Punto de reblandecimiento	°C	110	-	72.1	55.6	57.8	60
Penetración	dmm	-	25	30	60.67	58.33	51.67
Pérdida por calentamiento	% m	-	1.0	0.73	0.23	0.30	0.26
Contenido de cenizas	% m	-	5.0				

Nota. Ningún asfalto modificado con el 1, 3, 5 y 7 % de PET reciclado cumple con los requisitos. Adaptado de *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2137:98. Productos derivados del petróleo. Impermeabilizantes. Másticos bituminosos modificados. Requisitos.* (p.5), 1998, Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN.

4.6 Comparativos entre las propiedades físico-químicas del asfalto inicial y los modificados

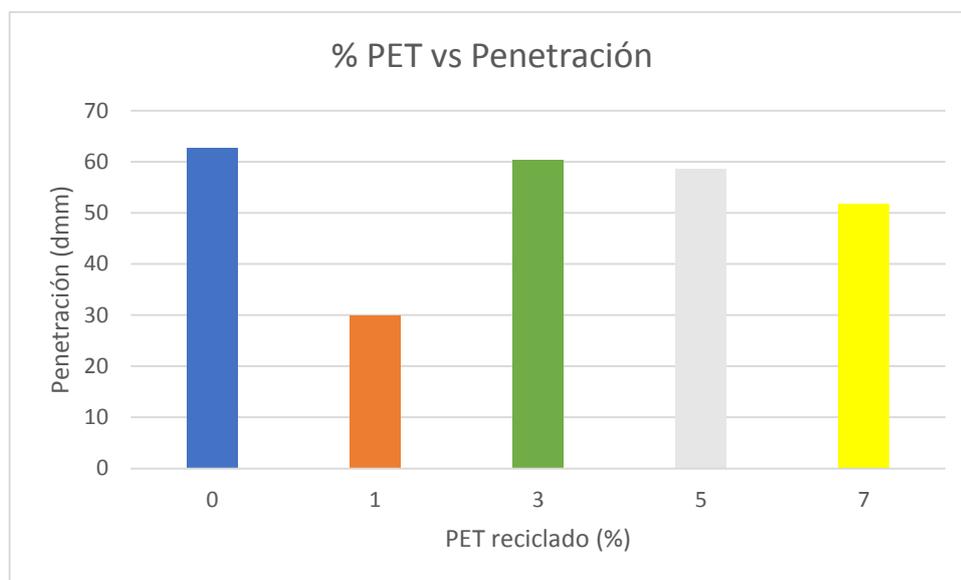
La comparación de las propiedades se las realizó con el fin de determinar la influencia de la cantidad PET reciclado en las mezclas y compararlo con el asfalto virgen utilizado para el desarrollo de estas modificaciones. Las propiedades físico-químicas de las mezclas asfálticas se los realizaron a todos los porcentajes a pesar de no tener una incorporación total del PET reciclado con el 3, 5 y 7%, respectivamente.

4.6.1 Penetración

En la Figura 5 se observa la variación de la penetración conforme la cantidad de PET reciclado adicionada en la mezcla. A medida que aumenta la cantidad de PET reciclado en la mezcla lo hace más duro.

Figura 5

Porcentaje de PET reciclado en la mezcla vs penetración (dmm)



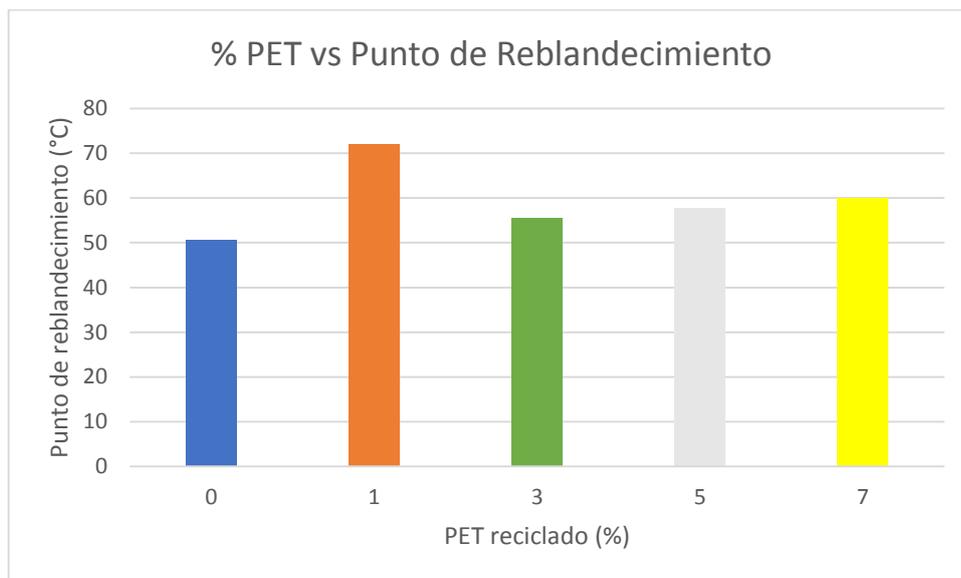
Nota. La penetración tiene que ser máximo de 25 dmm, ninguna mezcla cumple con la normativa NTE INEN 2137:98.

4.6.2 Punto de reblandecimiento

En la Figura 6 se observa la variación del punto de reblandecimiento conforme la cantidad de PET reciclado adicionada en la mezcla, a medida que aumenta la cantidad de PET reciclado en la mezcla lo hace más resistente a la temperatura.

Figura 6

Porcentaje de PET reciclado en la mezcla vs punto de reblandecimiento (°C)



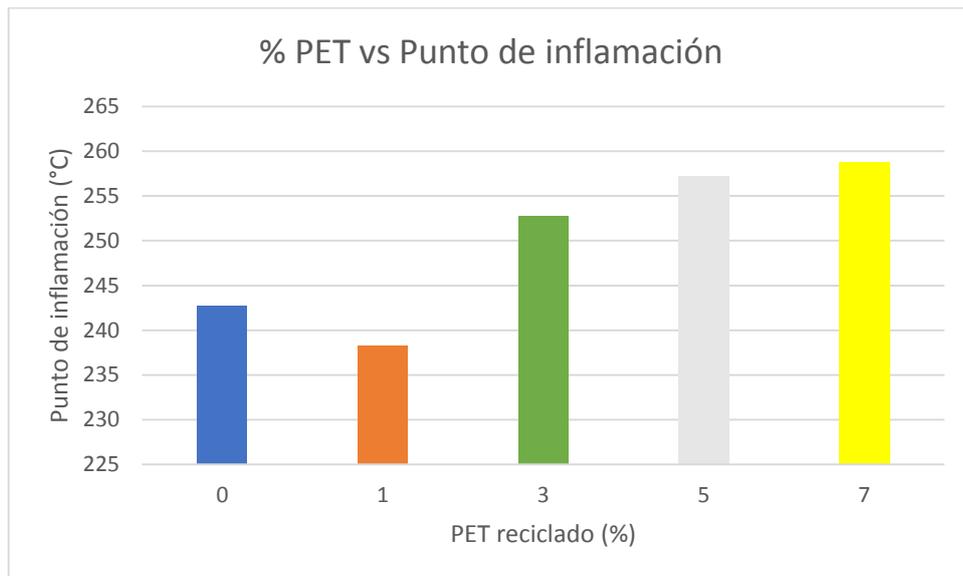
Nota. El punto de reblandecimiento tiene que ser mínimo 110°C, ninguna mezcla cumple con la normativa NTE INEN 2137:98.

4.6.3 Punto de inflamación

En la Figura 7 se observa la variación del punto de inflamación conforme la cantidad de PET reciclado adicionada en la mezcla, a medida que aumenta la cantidad de PET reciclado en la mezcla lo hace menos inflamable.

Figura 7

Porcentaje de PET reciclado en la mezcla vs punto de inflamación (°C)



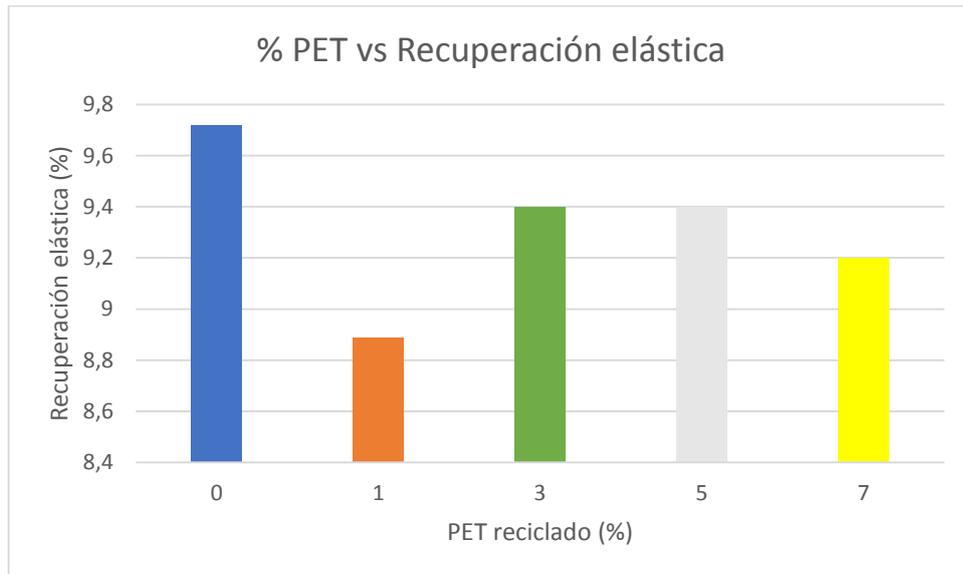
Nota. El punto de inflamación mientras es mayor es mejor para que no sea peligroso en la instalación.

4.6.4 Recuperación elástica

En la Figura 8 se observa la variación de la recuperación elástica conforme la cantidad de PET reciclado adicionada en la mezcla, a medida que aumenta la cantidad de PET reciclado en la mezcla lo hace menos elástico.

Figura 8

Porcentaje de PET reciclado en la mezcla vs Recuperación elástica (%)



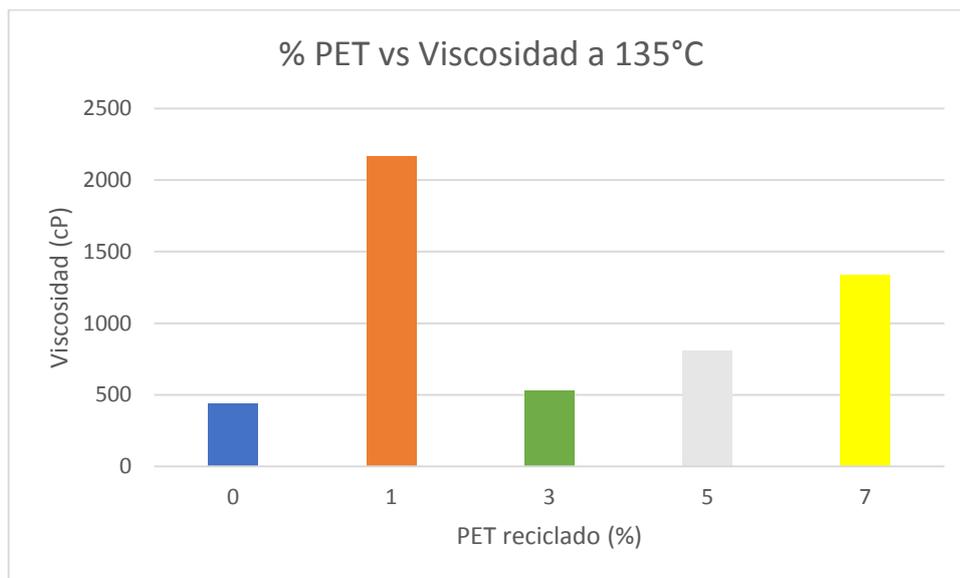
Nota. La recuperación elástica depende de la funcionalidad que requiera la lámina.

4.6.5 Viscosidad a 135 °C

En la Figura 9 se observa la variación de la pérdida de masa por calentamiento conforme la cantidad de PET reciclado adicionada en la mezcla, a medida que aumenta la cantidad de PET reciclado en la mezcla lo hace más viscoso.

Figura 9

Porcentaje de PET reciclado en la mezcla vs Viscosidad a 135 °C (cP)



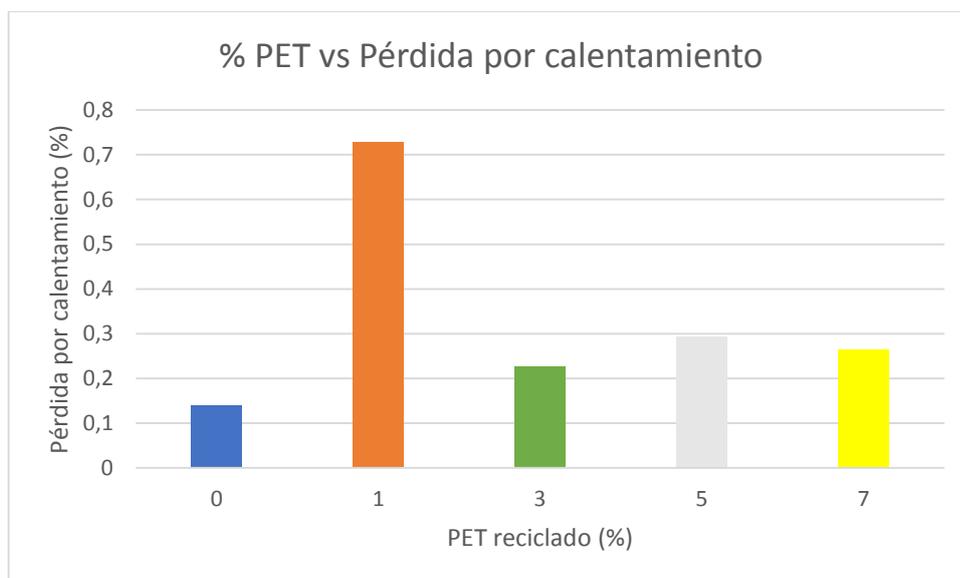
Nota. La viscosidad a elevadas temperaturas sirve para determinar la potencia necesaria para mover el fluido.

4.6.6 Pérdida por calentamiento

En la Figura 10 se observa la variación de la pérdida de masa por calentamiento conforme la cantidad de PET reciclado adicionada en la mezcla, a medida que aumenta la cantidad de PET reciclado en la mezcla lo aumenta la pérdida por calentamiento.

Figura 10

Porcentaje de PET reciclado en la mezcla vs pérdida por calentamiento (%)



Nota. La pérdida por calentamiento debe ser menor a 1%, todas las mezclas cumplen con el requerimiento de la normativa NTE INEN 2137:98.

Capítulo V

5 Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Se diseñaron asfaltos modificados como base para el desarrollo de láminas asfálticas impermeabilizantes a partir de tereftalato de polietileno reciclado y asfalto AC-20. Ninguna mezcla cumplió con todos los requerimientos físico-químicos establecidos por las normativas UNE 104232: Parte 2 y la NTE INEN 2137:98.

Se determinaron las propiedades físico-químicas del asfalto proveniente de la Refinería de Esmeraldas, mismo que será usado como base para el desarrollo de las mezclas. Las propiedades físico-químicas del asfalto virgen utilizado como base para el desarrollo del presente estudio, proveniente de la Refinería de Esmeraldas, se encuentran dentro de los rangos establecidos por la normativa NTE INEN 2515:2010 por lo que se lo clasifica como un asfalto tipo AC-20.

Se determinaron las condiciones óptimas de homogenización con el fin de asegurar la compatibilidad entre el 1% del material modificante y el asfalto. Las condiciones óptimas son adicionar el PET reciclado a 150°C, utilizar el disco de Cizallamiento a 5000 RPM, manteniendo un rango de temperatura de 170-180°C durante 150 minutos.

Se determinó la correcta dispersión del 1% del material modificante en el asfalto, mediante microscopia de la mezcla asfáltica. La dispersión del 1% de PET reciclado avanza con el tiempo de homogenización a condiciones controladas, la dispersión total del polímero se lo alcanza a los 150 minutos de homogenización.

Se determinaron las propiedades físico-químicas de los asfaltos modificados con el 1, 3, 5 y 7% de PET reciclado, a las condiciones previamente establecidas. Las propiedades físico-químicas cambiaron dependiendo el porcentaje de PET reciclado adicionado.

Se compararon las propiedades físico-químicas de las mezclas asfálticas y el asfalto inicial. Las mezclas asfálticas con PET reciclado tienen características más plásticas que el asfalto inicial.

Se determinó la viabilidad técnica de utilizar el Tereftalato de polietileno (PET) reciclado como material modificante del asfalto, para ser usado como base para el desarrollo de láminas asfálticas impermeabilizantes. No es viable a los porcentajes y condiciones estudiadas ya que no cumplen con los requerimientos de las propiedades físico-químicas establecidas para másticos modificados para la impermeabilización por las normativas UNE 104232: Parte 2 y la NTE INEN 2137:98.

Las condiciones de homogenización que garanticen compatibilidad y una correcta dispersión del Tereftalato de polietileno reciclado en asfalto AC-20 varían dependiendo el porcentaje de polímero utilizado.

La penetración es inversamente proporcional al porcentaje de Tereftalato de polietileno reciclado utilizado en la modificación del asfalto, esto se da ya que el asfalto modificado se hace más duro como el PET utilizado.

El punto de reblandecimiento es directamente proporcional al porcentaje de Tereftalato de polietileno reciclado utilizado en la modificación del asfalto, el PET aporta a la mezcla mayor resistencia a la temperatura.

La recuperación elástica es inversamente proporcional al porcentaje de Tereftalato de polietileno reciclado utilizado en la modificación del asfalto, el PET es un plástico por lo que la mezcla resultante adquiere sus propiedades de no recuperar su forma inicial.

El punto de inflamación es directamente proporcional al porcentaje de Tereftalato de polietileno reciclado utilizado en la modificación del asfalto, el punto de inflamación del PET es superior al del asfalto virgen.

5.2 Recomendaciones

Determinar condiciones operación para cada porcentaje de Tereftalato de Polietileno reciclado y así asegurar la compatibilidad del asfalto con los diferentes porcentajes de PET en las mezclas.

Realizar modificaciones del asfalto AC-20 a las mismas condiciones de homogenización con el 0.75, 1, 1.25, 1.5 y 2% de Tereftalato de polietileno reciclado y comparar sus propiedades físico-químicas con los requerimientos establecidos por las normativas UNE 104232: Parte 2 y la NTE INEN 2137:98.

Determinar la estabilidad de la mezcla mediante normativa para verificar que no cambie la distribución interna del material modificante.

Modificar otros tipos de asfalto con Tereftalato de Polietileno reciclado y comparar sus propiedades físico-químicas con los requerimientos establecidos por las normativas UNE 104232: Parte 2 y la NTE INEN 2137:98.

Bibliografía

- Chanda, M. (2013). *Introduction to polymer science and chemistry: a problem-solving approach*. CRC Press.
- Fahim, M. A., Al-Sahhaf, T. A., & Elkilani, A. (2009). *Fundamentals of petroleum refining*. Elsevier.
- Gary, J. H., Handwerk, G. E., & Kaiser, M. J. (2007). *Petroleum refining: technology and economics*. CRC press.
- Hunter, R. N., Self, A., & Read, J. (2015). Contents and Preliminary Pages. In *The Shell Bitumen Handbook* (pp. i–xvii). ICE Publishing.
- Ji, L. N. (2013). Study on preparation process and properties of polyethylene terephthalate (PET). *Applied Mechanics and Materials*, 312, 406–410.
- Mackay, D., Shiu, W. Y., & Ma, K.-C. (1997). *Illustrated handbook of physical-chemical properties of environmental fate for organic chemicals* (Vol. 5). CRC press.
- McNally, T. (2011). *Polymer modified bitumen: Properties and characterisation*. Elsevier.
- Newbery, J. A., Solanas, F. E., Herrero, F., & Thierry, J. C. (2007). *El petróleo* (Issue 17). Ediciones Colihue SRL.
- Ravindranath, K., & Mashelkar, R. A. (1986). Polyethylene terephthalate—I. Chemistry, thermodynamics and transport properties. *Chemical Engineering Science*, 41(9), 2197–2214.
- Ravve, A. (2013). *Principles of polymer chemistry*. Springer Science & Business Media.
- Robinson, H. (2005). *Polymers in asphalt* (Vol. 15, Issue 11). iSmithers Rapra Publishing.
- Rudnik, E. (2019). *Compostable polymer materials*. Newnes.
- Speight, J. G. (1997). *Petroleum chemistry and refining*. CRC Press.
- Speight, J. G. (2016). *Asphalt materials science and technology*. Springer.
- Speight, J. G., & Ozum, B. (2001). *Petroleum refining processes*. CRC Press.
- Urpí, J. L. (2012). *Tecnología y margen de refino del petróleo*. Ediciones Díaz de Santos.

Wagner, M., & Lambert, S. (2018). *Freshwater microplastics: emerging environmental contaminants?* Springer Nature.

Wess, J. (2004). *Asphalt (bitumen)* (Issue 59). World Health Organization.

Young, R. J., & Lovell, P. A. (2011). *Introduction to polymers*. CRC press.

Anexos