



Análisis comparativo de asfaltos modificados con Estireno-butadieno-estireno (SBS) y Polietileno (PE) reciclado mediante determinación de propiedades físico-químicas para su aplicación en láminas impermeabilizantes

Mena Pacheco, Wellington Steven

Departamento de Ciencias de la Energía Y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Petroquímica

Trabajo de Titulación, Previo a la obtención del título de Ingeniero en Petroquímica

Luna Ortiz, Eduardo David, M. Sc.

15 de febrero de 2022

Latacunga



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN PETROQUÍMICA**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“Análisis comparativo de asfaltos modificados con Estireno-butadieno-estireno (SBS) y Polietileno (PE) reciclado mediante determinación de propiedades físico-químicas para su aplicación en láminas impermeabilizantes”** fue realizado por el señor **Mena Pacheco, Wellington Steven** 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, febrero del 2022



Firmado electrónicamente por:
**EDUARDO
DAVID LUNA
ORTIZ**

Luna Ortiz, Eduardo David, M. Sc.

C. C.: 1802724912

Reporte de verificación de contenido



Tesis_MenaS_v2 (1).pdf

Scanned on: 19:3 February 16, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	276
Words with Minor Changes	55
Paraphrased Words	99
Omitted Words	46



EDUARDO
DAVID LUNA



Website | Education | Businesses



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN PETROQUÍMICA

Responsabilidad de autoría

Yo, **Mena Pacheco, Wellington Steven**, con cédula de ciudadanía N° 0503298804, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Análisis comparativo de asfaltos modificados con Estireno-butadieno-estireno (SBS) y Polietileno (PE) reciclado mediante determinación de propiedades físico-químicas para su aplicación en láminas impermeabilizantes”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, febrero del 2022

Mena Pacheco, Wellington Steven

C.C.: 0503298804



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN PETROQUÍMICA**

Autorización de publicación

Yo, Mena Pacheco, Wellington Steven, con cédula de ciudadanía N° 0503298804, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Análisis comparativo de asfaltos modificados con Estireno-butadieno-estireno (SBS) y Polietileno (PE) reciclado mediante determinación de propiedades físico-químicas para su aplicación en láminas impermeabilizantes**” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, febrero de 2022

Mena Pacheco, Wellington Steven

C.C.: 0503298804

Dedicatoria

A mi persona por culminar con esta etapa con perseverancia, resiliencia y sentido del deber.

Agradecimiento

Agradecimiento a mi familia por su apoyo económico, sin ello no habría logrado completar esta etapa impuesta en mi vida.

A mis hermanas Katherine y Karla por ser ejemplos, además de darme paz y su apoyo a lo largo de mi vida.

A mis compañeros de carrera quienes compartieron conmigo varios momentos en la universidad, tanto buenos como malos.

Al equipo de IMPTEK, Sandra, Valeria, Juan, Wilfrido, Paul y Fernanda por permitirme ser parte del equipo, asimismo, por su ayuda, sus enseñanzas y su conocimiento que impulsaron mi crecimiento personal y profesional.

Al Dr. Román Rodríguez quién fue ejemplo y referente como persona y en la ciencia durante toda la carrera.

Al Ing. David Luna por todo su apoyo, por su paciencia y conocimiento que me ha otorgado en este tiempo; un gran maestro tanto en la carrera como en la vida.

Al Dr. Pablo Tuza por darme la oportunidad de trabajar a su lado, además de ser un excelente profesor por su rectitud y dedicación a la carrera.

Tabla de contenidos

Carátula.....	1
Certificación.....	2
Reporte de verificación de contenido	3
Responsabilidad de autoría.....	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento	7
Tabla de contenidos.....	8
Índice de figuras	12
Índice de tablas	14
Resumen	16
Abstract.....	17
Introducción.....	18
Antecedentes	18
Planteamiento del problema	20
Justificación e importancia	21
Objetivos generales y específicos.....	22
<i>Objetivo general</i>	22
<i>Objetivos específicos</i>	22
Hipótesis	22
Variables de la investigación	22
<i>Variable dependiente</i>	22
<i>Variable Independiente</i>	22
Fundamentación Teórica	23
Asfalto	23

<i>Química del bitumen</i>	23
<i>Requisitos de asfalto obtenidos de la destilación del petróleo</i>	24
Pruebas de rutina y propiedades mecánicas de asfaltos	24
<i>Ensayos de especificación estándar para asfaltos y asfaltos modificados</i>	25
<i>La prueba de penetración</i>	25
<i>La prueba del punto de reblandecimiento</i>	26
<i>Viscosidad</i>	27
<i>Punto de inflamacion</i>	28
<i>Recuperación elastica</i>	29
<i>Verificación de requisitos de los betunes modificados</i>	30
Polímeros y su relación con el bitumen	31
<i>Polietileno (PE)</i>	31
<i>Estireno-Butadieno-Estireno (SBS)</i>	32
Consideraciones para usos de polímeros en mezclas de bitumen	33
<i>Compatibilidad</i>	34
Modificación de bitumen con polímeros	34
<i>Modificación de bitumen usando elastómeros termoplásticos</i>	34
<i>Modificación de bitumen usando plastómeros</i>	38
Diseño experimental	38
<i>Diseño factorial mixto</i>	38
<i>Diseño factorial 3k</i>	38
Graficas de efectos estandarizados	38
<i>Diagrama de Pareto de efectos estandarizados</i>	38
<i>Gráficas de interacción</i>	39
<i>Gráficas de efectos principales</i>	40

Metodología	42
Introducción.....	42
Diseño experimental.....	44
<i>Diseño factorial mixto para determinar la compatibilidad y las condiciones de trabajo óptimas</i>	44
<i>Diseño factorial para analizar las propiedades físico-químicas de las mezclas asfálticas modificadas</i>	45
Caracterización y obtención de materiales.....	46
Preparación de mezclas de asfalto modificado	48
Análisis de compatibilidad y dispersión de las mezclas de asfalto modificado.....	49
Ensayos de especificación para asfalto y mezclas de asfalto modificado ..	57
<i>Punto de reblandecimiento</i>	57
<i>Penetración</i>	59
<i>Densidad</i>	61
<i>Punto de inflamación</i>	62
<i>Recuperación elástica</i>	64
<i>Viscosidad</i>	65
Análisis y Discusión de Resultados.....	67
Punto de reblandecimiento	67
Penetración	69
Densidad	71
Punto de inflamación.....	74
Recuperación elástica	76
Viscosidad.....	79
Requisitos de betunes modificados para material impermeabilizante	81

Conclusiones y Recomendaciones.....	83
Conclusiones	83
Recomendaciones	85
Bibliografía.....	86
Anexos	91

Índice de figuras

Figura 1	<i>Penetrómetro manual</i>	26
Figura 2	<i>Equipo para prueba de reblandecimiento</i>	27
Figura 3	<i>Viscosímetro rotacional</i>	28
Figura 4	<i>La prueba de punto de inflamación en copa abierta Cleveland</i>	29
Figura 5	<i>Equipo para prueba de recuperación elástica</i>	30
Figura 6	<i>Representación esquemática del copolímero SBS en betún: una red polimérica tridimensional a temperatura ambiente</i>	35
Figura 7	<i>Microscopía de SBS al 4.5 % mezclado con betún</i>	36
Figura 8	<i>Microscopía de SBS al 3 % mezclado con betún</i>	36
Figura 9	<i>Efecto de la aromaticidad y el contenido de asfaltenos en la estabilidad del caucho termoplástico</i>	37
Figura 10	<i>Diagrama de Pareto de efectos estandarizados</i>	39
Figura 11	<i>Gráficas de interacción</i>	40
Figura 12	<i>Gráficas de efectos principales</i>	41
Figura 13	<i>Resumen de la metodología de investigación</i>	42
Figura 14	<i>Polímeros usados en el trabajo de investigación</i>	48
Figura 15	<i>Diagrama de Pareto para Punto de reblandecimiento</i>	67
Figura 16	<i>Gráfica de interacción para Punto de reblandecimiento</i>	68
Figura 17	<i>Gráfica de efectos para Punto de reblandecimiento</i>	69
Figura 18	<i>Diagrama de Pareto para Penetración</i>	70
Figura 19	<i>Gráfica de interacción para Penetración</i>	70
Figura 20	<i>Gráfica de efectos para Penetración</i>	71
Figura 21	<i>Diagrama de Pareto para Densidad</i>	72
Figura 22	<i>Gráfica de interacción para Densidad</i>	73
Figura 23	<i>Gráfica de efectos para Densidad</i>	74

Figura 24	<i>Diagrama de Pareto para Punto de Inflamación.....</i>	<i>75</i>
Figura 25	<i>Gráfica de interacción para Punto de inflamación.....</i>	<i>75</i>
Figura 26	<i>Gráfico de principales para Punto de inflamación</i>	<i>76</i>
Figura 27	<i>Diagrama de Pareto para Recuperación elástica</i>	<i>77</i>
Figura 28	<i>Gráfica de interacción para Recuperación elástica</i>	<i>78</i>
Figura 29	<i>Gráfica de efectos para Recuperación elástica.....</i>	<i>79</i>
Figura 30	<i>Gráfica de viscosidad vs. temperatura para polímeros al 2%.....</i>	<i>80</i>
Figura 31	<i>Gráfica de viscosidad vs. temperatura para polímeros al 2.25%.....</i>	<i>80</i>
Figura 32	<i>Gráfica de viscosidad vs. temperatura para polímeros al 2.5%.....</i>	<i>81</i>

Índice de tablas

Tabla 1	Requisitos de cementos asfálticos, para los tipos comprendidos de 200 dmm a 20 dmm de penetración.....	24
Tabla 2	Requisitos fisicoquímicos de los másticos modificados (betún modificado con polímeros)	31
Tabla 3	Propiedades del polietileno	32
Tabla 4	Ensayos de especificación para asfaltos y asfaltos modificados	43
Tabla 5	Diseño factorial para determinar la compatibilidad y las condiciones de trabajo óptimas	45
Tabla 6	Diseño factorial 3^2 para analizar las propiedades físico-químicas de las mezclas asfálticas modificadas	46
Tabla 7	Resultados de las propiedades fisicoquímicas del asfalto	47
Tabla 8	Resultados de Microscopía SBS 2%, T= 195-205 °C, Agitación=1000 rpm.....	50
Tabla 9	Resultados de Microscopía SBS 2%, T= 210-220 °C, Agitación=1000 rpm.....	51
Tabla 10	Resultados de Microscopía LDPE 2%, T= 165-175 °C, Agitación=1000 rpm.	52
Tabla 11	Resultados de Microscopía LDPE 2%, T= 175-185 °C, Agitación=1000 rpm.	53
Tabla 12	Resultados de Microscopía LDPE 2%, T= 165-175 °C, Agitación=1000 rpm.	54
Tabla 13	Resultados de Microscopía LDPE 2%, T= 175-185 °C, Agitación=1000 rpm.	55
Tabla 14	Resultados de la prueba de homogeneidad	57
Tabla 15	Resultados de la prueba de punto de reblandecimiento	59
Tabla 16	Resultados de la prueba de penetración	60
Tabla 17	Resultados de la prueba de densidad	62
Tabla 18	Resultados de la prueba de inflamación	63
Tabla 19	Resultados de la prueba de recuperación elástica	65
Tabla 20	Resultados de la prueba de viscosidad de 125 a 145°C.....	66
Tabla 21	Resultados de la prueba de viscosidad de 155 a 175°C.....	66

Tabla 22 Comparativo de norma INEN 2137 con resultados de mezclas con SBS81

Tabla 23 Comparativo de norma INEN 2137 con resultados de mezclas con LDPE82

Tabla 24 Comparativo de norma INEN 2137 con resultados de mezclas con HDPE....82

Resumen

En el presente trabajo de titulación se comparan las propiedades fisicoquímicas de mezclas de bitumen modificado con polímeros como Estireno-Butadieno-Estireno, polietileno de alta densidad reciclado y polietileno de baja densidad reciclado empleados industrialmente en IMPTEK Chova del Ecuador. Estas mezclas son analizadas mediante un primer diseño experimental mixto donde se evalúa la dispersión y compatibilidad de las mezclas de bitumen a diferentes intervalos de tiempo, 2 rangos de temperatura, composición del 2% de polímero modificante y agitación constante; las condiciones ideales para las mezclas de bitumen modificado se los obtiene de este procedimiento. Con los datos obtenidos del primer diseño experimental se procede al análisis de las propiedades fisicoquímicas de las mezclas mediante un diseño factorial 3^k que determina estas propiedades de las mezclas de bitumen modificado como: Punto de reblandecimiento, penetración, punto de inflamación, densidad, viscosidad y recuperación elástica; los procedimientos para estos experimentos se los realiza en base a normas del Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN), Asociación Española de Normalización y Certificación (UNE), Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM) y American Society of Testing Materiales (ASTM). Los datos obtenidos son analizados por un software estadístico mediante graficas como: Diagrama de Pareto, graficas de efectos estandarizados y graficas de interacción.

- **Palabras clave:**
 - **ASFALTO**
 - **POLIMEROS**
 - **RECICLAJE DE PLÁSTICO**
 - **BITUMEN MODIFICADO**
 - **LÁMINAS IMPERMEABILIZANTES**

Abstract

In the present degree work, the physicochemical properties of mixtures of modified bitumen with polymers such as Styrene-Butadiene-Styrene, recycled high-density polyethylene and recycled low-density polyethylene used industrially in IMPTEK Chova del Ecuador are compared. These mixtures are analyzed by means of a first mixed experimental design where the dispersion and compatibility of the bitumen mixtures are evaluated at different time intervals, 2 temperature ranges, composition of 2% modifying polymer and constant agitation; The ideal conditions for modified bitumen mixtures are obtained from this procedure. With the data obtained from the first experimental design, the physicochemical properties of the mixtures are analyzed using a 3^k factorial design that determines these properties of the modified bitumen mixtures such as: softening point, penetration, flash point, density, viscosity and elastic recovery; The procedures for these experiments are carried out based on the standards of the Ecuadorian Standardization Service (INEN), the Spanish Association for Standardization and Certification (UNE), the Argentine Institute for Standardization and Certification (IRAM) and the American Society of Testing Materials (ASTM). The data obtained is analyzed by statistical software using graphs such as: Pareto diagram, graphs of standardized effects and interaction graphs.

- Key words:

- ASPHALT
- POLYMERS
- PLASTIC RECYCLING
- MODIFIED BITUMEN
- WATERPROOFING SHEETS

Capítulo I

1. Introducción

1.1. Antecedentes

Los asfaltos modificados con polímeros se han estado utilizado en Ecuador desde hace mucho tiempo, sin embargo, la utilización de aquellos materiales no contribuyen de manera beneficiosa para el medio ambiente y la mitigación de la contaminación es aún más difícil. Por ello, esta investigación tiene como objetivo la reutilización de polímeros como el polietileno PE en mezclas con asfalto con el fin de mantener y mejorar propiedades fisico-químicas, siendo superior en el ámbito económico y ecológico. (Revelo, 2014)

Debido a la creciente escasez en la producción de petróleo tanto nacional como internacionalmente, sus derivados como el asfalto consecuentemente tendrán una gran dificultad en su obtención. Por ello, la oportunidad y la necesidad de encontrar materiales nuevos que mantengan o mejoren propiedades en mezclas asfálticas es de vital importancia. Esta técnica de la mezcla de asfalto con polímeros ya ha sido estudiado y ampliamente verificada por su aplicación en la construcción. Muchas de las propiedades mecánicas, fisico-químicas y reológicas se modifican significativamente con la adición de estos materiales poliméricos que al momento de evaluarse en condiciones ambientales y de tensión se aprecia una gran mejoría. (Maila, 2013)

El grado de desarrollo tanto social como económico de una nación se puede ver reflejado en el sector de la construcción, siendo esto una evidencia que en las últimas décadas se ha visto en Ecuador un incremento en este ámbito cumpliendo con especificaciones de seguridad, calidad y durabilidad. Así, las láminas flexibles impermeabilizantes han tomado una gran parte en la construcción de una vivienda en presnetación de láminas de apoyo peformadas en fábrica. El problema más común en la construcción de una vivienda es la penetración del agua al perturbar la comodidad y generar corrosión y riesgos con equipos eléctricos, por ello, es deseable reducir o mitigar este efecto con la apliación de láminas impermeabilizantes. (Cedeño & Espín, 2014; Kindt et al., 1991)

En países desarrollados como Estados Unidos la gran mayoría de casas poseen techos de base asfáltica. Asimismo, los contrapisos y paredes en países desarrollados

han tenido la necesidad de la producción de materiales impermeables y autoadhesivos a base de asfalto que tienen una característica no adherible con tejas y que en climas fríos posean relativamente flexibilidad. En consecuencia, con el fin de reducir cantidad y costo de materiales base como el asfalto, para la fabricación del producto, a la mezcla se añaden materiales de relleno siempre con la seguridad que las propiedades, calodad, y funcionalidad del producto terminado no varía significativamente o en efecto se espera su mejora en propiedades. (Zickell & Karlis, 2010)

En ciertas aplicaciones como recubrimientos de paredes, suelos y superficies similares, las láminas adhesivas tienen una gran importancia en el uso industrial con el objetivo de juntar múltiples capas de material laminar. Con la unión de una lámina de polímero resinoso o una lámina revestida con este material junto con una banda afieltrada fibrosa se puede crear una clase de material flexible para revestimiento superficies. Algunas de las características de los materiales adhesivos laminados es que deber tener fluidez a relativamente altas temperaturas para que estos pueda aplicarse fácilmente, además de presentar a bajas temperaturas una buena flexibilidad según fuerzas cohesivas y adhesivas, esto con el fin de ofrecer practicidad del producto. La manipulación de estos productos se da en la forma de enrollar y desenrollar los revestimientos flexibles para superficies. (Cubberley et al., 1951)

Algunos materiales con composiciones a base de caucho y asfalto por su costo relativamente bajo se han estado utilizando como laminas adhesivas para unir materiales flexibles. Empero, debido a que algunas características o especificaciones aun no cumplen lo requerido para dar buena practicidad, estas composiciones adhesivas aun no demuestran ser totalmente de éxito. (Cubberley et al., 1951)

Para obtener una buena deformación de forma permanente a altas temperaturas se han estado utilizando los plastómeros, los cuales combinan características de elastómeros y plásticos. Algunos de estos materiales denominados plastómeros son comúnmente empleados para modificar características del asfalto, por ejemplo, polietileno (PE), etileno-acetato de vinilo (EVA), polipropileno (PP), y etileno-butyl acrilato (EBA). Algunos estudios han reportado la mejoría que se ha dado en la resistencia a la formación de surcos de las mezclas asfálticas modificadas con el plastómero PE. No obstante, otros estudios han reportado que la adición de PE a las mezclas con asfalto no ha resultado en una mejoría en las características a baja temperatura y en su recuperación elástica en comparación con el bitumen. Por ello, materiales reciclados

fueron seleccionados como agentes modificadores en este trabajo por su costo barato, buena calidad y por su practicidad. (Zhang et al., 2019)

1.2. Planteamiento del problema

Una gran fuente de materia y energía se encuentra justamente en los desechos de polímeros y su reciclaje. Debido a que el cuidado del medio ambiente es un tema esencial en esta época se ha intentado aprovechar esta fuente para minorar problemas relacionados a la contaminación. Los polímeros tienen sus características propias que con el tiempo se pierden parcialmente, sin embargo, aún puede ser aprovechados dichos polímeros. Actualmente, las formas modernas para la recuperación de desechos polímeros son el reciclaje químico o el reciclaje mecánico por trituración. (Synyuk et al., 2020)

Se debe tener en cuenta que el proceso de reciclaje químico tiene varios factores que no benefician de gran manera a los materiales y al ambiente. Uno de los principales problemas del reciclaje químico es el colapso de la estructura macromolecular del material a reciclar. Además, se necesita un gran financiamiento al contemplar varias operaciones unitarias, insumos y reactivos necesarios para la etapa de recuperación de un monómero correcto para su posterior repolimerización. Por otro lado, el proceso mecánico de reciclaje tiene varias ventajas como la no necesidad de varios equipos y reactivos. A su vez, este proceso mecánico se puede implementar en cualquier espacio donde se gestionan los residuos. Una característica principal de este proceso es la preservación de la estructura del polímero. (Synyuk et al., 2020)

Es una realidad que no todos los productos plásticos pueden ser reciclados, sin embargo, este tema tiene más énfasis desde un aspecto ecológico. Alrededor de 1-2 % de los materiales plásticos se reutilizan directamente por los requisitos de calidad de los productos a derivarse. Usualmente en los residuos urbanos sólidos se puede encontrar en un gran porcentaje del 60% los productos como el polipropileno y el polietileno (PE), mientras que en el porcentaje restante de los residuos urbanos sólidos se encuentran los demás productos plásticos como el cloruro de polivinilo, polietilentereftalato, poliestireno, etc. (Córdoba et al., 2010)

La reutilización de materiales reciclados es un tema en que se debe insistir con el fin de menguar el daño ambiental, consecuentemente las mezclas asfálticas mejoraran y tomaran parte en el diseño de productos con característica superiores. En la actualidad, el disminuir los índices de contaminación es una medida principal a tener en cuenta. Por ello se impulsa frecuentemente el tratamiento, el reciclaje y la reutilización de desperdicios. (Cedeño & Espín, 2014)

1.3. Justificación e importancia

La meta para estos trabajos de investigación es incentivar y aprovechar los desechos, así como motivar el cuidado del medio ambiente y obtener más eficiencia en el uso de energía y materia aprovechando dichos materiales destinados a la basura. Es esencial la búsqueda de mecanismos que aporten a la reducción de contaminantes en el ambiente que tienen gran impacto nocivo para la vida a causa de materiales no biodegradables. (Cedeño & Espín, 2014)

Ciertos polímeros de industrias se pueden añadir a la estructura de materiales destinados al sector de la construcción con el fin de mejorar capacidades mecánicas y su vida útil. Conscientemente se vive en una cultura de desperdicio, y cotidianamente en vuestra basura se encuentran recursos que en un futuro podrán ser utilizados. Se debe tratar de implementar el proceso de reducir, reutilizar y reciclar para que este tipo de investigaciones puedan dar una idea favorable en los residuos sólidos en el ambiente. (Lizcano, 2007)

Los proyectos con tendencia al reciclaje y postratamiento de residuos están en aumento, puesto que este es un objetivo de la sociedad actualmente. En estas investigaciones suelen tratarse desechos no biodegradables que afectan con la emisión de lixiviados y la vida útil de rellenos sanitarios. (Revelo, 2014)

Lo que se verifica es el mejor desempeño dependiendo de los diseños de la mezcla asfáltica junto con sus propiedades físico-químicas y mecánicas como punto de reblandecimiento, penetración, etc., donde por los diferentes ligantes asfálticos en las mezclas se analiza intrínsecamente. (Estrada, 2017)

Para el usuario, el desarrollo y la seguridad es algo esencial y mediante el uso de estas mezclas de asfalto modificado con polímeros reciclados se lo conseguirá. Un

proyecto de construcción donde se utilice estas mezclas traerá un mejor confort y servicio a su vez que se tendrá mejores costos en su mantenimiento. (Estrada, 2017)

1.4. Objetivos generales y específicos

1.4.1. Objetivo general

- Comparar asfaltos modificados con Estireno-butadieno-estireno (SBS) y Polietileno (PE) reciclado mediante determinación de propiedades físico-químicas para su aplicación en láminas impermeabilizantes.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar las propiedades físico-químicas del asfalto proveniente de La Refinería de Esmeraldas mediante ensayos basados en normas nacionales e internacionales.
- Evaluar las condiciones óptimas y la compatibilidad del asfalto proveniente de La Refinería de Esmeraldas con los polímeros (SBS y PE reciclado) que se incorporarán en las mezclas asfálticas.
- Determinar las propiedades físico-químicas de las mezclas asfálticas modificadas mediante ensayos basados en normas nacionales e internacionales.
- Comparación de las propiedades físico-químicas de las mezclas asfálticas mediante análisis estadístico.

1.5. Hipótesis

La mezcla asfáltica modificada con PE reciclado ofrecerá un desempeño parecido en propiedades físico-químicas en comparación a la mezcla asfáltica modificada con SBS.

1.6. Variables de la investigación

1.6.1. Variable dependiente

Propiedades físico-químicas de la mezcla asfáltica modificada con SBS y PE reciclado.

1.6.2. Variable Independiente

Composición de la mezcla asfáltica modificada con SBS y PE reciclado.

Capítulo II

2. Fundamentación Teórica

2.1 Asfalto

Un producto del residuo de la destilación del petróleo es el betún, bitumen, cemento asfáltico o asfalto. Este material al cumplir con ciertas especificaciones de sus propiedades físicas se lo usa como material de ingeniería de construcción. Este es un producto básico con CAS #8052-42-4 o 64741-56-6. (Hunter et al., 2015)

Reológicamente, el bitumen posee características dependiendo su temperatura, es decir, a temperatura baja posee comportamiento elástico, mientras que a alta temperatura se comporta como material viscoso. (Pérez-Lepe et al., 2003)

El inicio de este material para la construcción se dio en la década de 1910 después del comienzo de la destilación al vacío en las refinerías de petróleo. (Roberts et al., 2002)

Dependiendo el origen del crudo, el bitumen se clasifica por su contenido estructural como aromático, parafínico o nafténico. Asimismo, su densidad oscila comúnmente entre 1.01 y 1.04 g/cc. El betún básicamente contiene según varios análisis entre 82 y 88% de carbono, 8 a 11% de hidrogeno, 0 a 6% de azufre, 0 a 1.5% de oxígeno, y 0 a 1% de nitrógeno. (Habib, 2013; Read & Whiteoak, 2003)

2.2.1 Química del bitumen

Según su fracción obtenido por cromatografía el bitumen se puede clasificar en saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos (SARA). La fracción no volátil y con peso molecular alto son los asfaltenos, siendo estos insolubles o precipitan en n-heptano y n-pentano. Para fraccionar el bitumen se usa la fracción SARA que lo clasifica en el orden

de contenido de heteroátomos, peso molecular y aromaticidad en este orden como $S < A < R < As$. (Habib, 2013; Masson & Polomark, 2001)

2.2.2 Requisitos de asfalto obtenidos de la destilación del petróleo

Para la correcta clasificación y uso del bitumen para su posterior modificación, este debe cumplir ciertos requisitos. Estos requisitos que debe cumplir el asfalto proveniente de la destilación del petróleo se detallan en la Tabla 1. (ASTM, 2018a; INEN, 2010)

Tabla 1

Requisitos de cementos asfálticos, para los tipos comprendidos de 200 dmm a 20 dmm de penetración

Ensayo	Grado de viscosidad
	AC-20
Viscosidad, 60 °C, Pa.s	200 ±40
Viscosidad, 135 °C, min, mm^2/s	210
Penetración, 25 °C, 100 g, 5 s, min	40
Punto de inflamación, Copa Cleveland Abierta, min, °C	232

Nota. Son los valores para clasificar asfaltos. Adaptado de INEN. (2010). PRODUCTOS DERIVADOS DEL PETRÓLEO. CEMENTO ASFÁLTICO (CLASIFICACIÓN POR VISCOSIDAD). REQUISITOS. NTE INEN 2 155:2010. En *Normativa Ecuatoriana de Materiales Bituminosos y Bituminosos Modificados*.

2.2 Pruebas de rutina y propiedades mecánicas de asfaltos

Para un material complejo como el bitumen, la respuesta al estrés depende del tiempo de carga y de la temperatura. Por ello, solo según la naturaleza de este material se deben realizar las pruebas de especificación sobre las propiedades. Esta gran cantidad de pruebas se las explica más adelante en este capítulo. (Hunter et al., 2015)

2.2.1 Ensayos de especificación estándar para asfaltos y asfaltos modificados

Debido a la amplia gama de grados existentes en bitumen, se realiza ensayos para definirlos. En gran mayoría de países, las pruebas de punto de reblandecimiento y penetración son las más optadas par estimar propiedades del material junto con la viscosidad a altas temperaturas y su módulo de rigidez. (Hunter et al., 2015)

Los métodos para realizar estas pruebas se determinan bajo condiciones bien definidas que son propuestos por institutos como: Instituto de Energía (métodos de prueba de IP), la Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) y la Institución Británica de Normas (BSI, por sus siglas en inglés). Cabe recalcar que los métodos de estas instituciones suelen ser idénticos. Sin embargo, las normativas de la Asociación Española de Normalización (UNE) y Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN) contienen algunas diferencias. (Hunter et al., 2015)

A continuación, se definen brevemente algunas de las pruebas de especificación estándar.

2.2.2 La prueba de penetración

Esta prueba mide el grado de penetración de un bitumen. Consiste en la inserción de una aguja con dimensiones específicas en el bitumen con carga, temperatura y tiempo definido según el grado de penetración estimado del bitumen. (Hunter et al., 2015; PyS, 2022)

Para la realización de esta prueba se usa el penetrómetro que se observa en la Figura 1.

Figura 1*Penetrómetro manual*

Nota. Equipo usado para prueba de penetración. Obtenido de PyS. (2022).

PENETRÓMETRO UNIVERSAL MANUAL. <https://pys.pe/producto/penetrometro-universal-manual/>

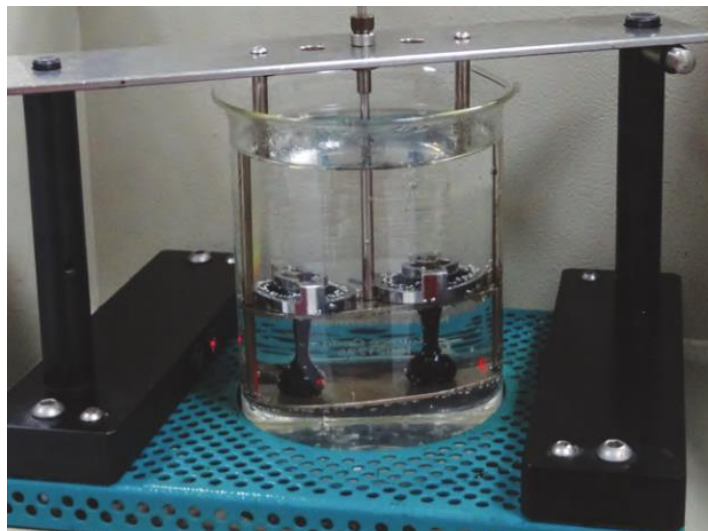
2.2.3 La prueba del punto de reblandecimiento

La prueba de reblandecimiento también es usada para medir el grado de penetración. Esta prueba consiste en la colocación de bolas metálicas en el centro de una muestra de bitumen contenida en un anillo metálico. Este contenido con las bolas de acero y anillos se introduce en un baño termostático en un vaso de precipitación llenado con agua o glicerina. (Hunter et al., 2015)

Para la realización de esta prueba se usa el Equipo para prueba de reblandecimiento que se observa en la Figura 2.

Figura 2

Equipo para prueba de reblandecimiento



Nota. Esta prueba tiene como componentes: los 2 anillos, las 2 guías de centro, el vaso de precipitación, el soporte y la termocupla. Obtenido de Hunter, R. N., Self, A., Read, J., & Hobson, E. (2015). *The shell bitumen handbook*. ICE Publishing London, UK

2.2.4 Viscosidad

Esta propiedad física de un fluido mide la resistencia al flujo. Técnicamente, es la relación entre el esfuerzo de corte y la tasa de deformación de corte de un fluido. Para diferentes condiciones se usan varios tipos de viscosímetros y reómetros. Entre los equipos más utilizados están los viscosímetros rotacionales, de copa y de capilar. (Hunter et al., 2015)

Para la realización de esta prueba se usa el Viscosímetro rotacional que se observa en la Figura 3.

Figura 3

Viscosímetro rotacional



Nota. Equipo usado en la prueba de viscosidad. Obtenido de Alibaba. (2022).

Viscosímetro Brookfield ASTM. <https://spanish.alibaba.com/product-detail/digital-petroleum-resin-viscosity-test-rotational-viscometer-brookfield-astm-d4402-60851312883.html>

2.2.5 Punto de inflamacion

Esta propiedad es definida como la temperatura del líquido más baja a la que la aplicación de una llama enciendan loss vapores soltados por la muestra. Esta prueba tiene como objetivo la determinación del punto de inflamación acerca de los derivados del petróleo y sus productos. Se usa una copa abierta Cleveland llenada con una muestra de prueba. Al inicio de la prueba la temperatura tiene un gradiente de temperatura alto y luego un gradiente de temperatura bajo cuando se acerca al punto de inflamación. Se pasa una llama de prueba por lo copa Cleveland según cierto tiempo especificado en una normativa. (ASTM, 2018b; Humboldt, 2022)

Para la realización de esta prueba se usa el Copa abierta Cleveland que se observa en la Figura 4.

Figura 4

La prueba de punto de inflamación en copa abierta Cleveland



Nota. Equipo usado en la prueba de Punto de inflamación. Obtenido de Humboldt. (2022). *Cleveland Flash and Fire Point Tester*. <https://www.humboldtmg.com/cleveland-open-cup-flash-tester-electric.html>

2.2.6 Recuperación elástica

Esta propiedad es definida como la capacidad de un cuerpo para recuprar su forma original despues de una torsion. Para esta prueba se sumerge una muestra en un cilindro metalico. Esta muestra tienen intervalos de reposo a temperatura abiente y en un baño termostatico a condiciones especificadas en una normal. Luego, con un dispositivo de torsion se gira un vastago sumergido en la muestras y en un tiempo fijado se toma los grados de recuperacion que da la muestra.(IRAM, 2011; PINZUAR, 2022)

Para la realización de esta prueba se usa el Equipo para la prueba de recuperación elástica que se observa en la Figura 5.

Figura 5

Equipo para prueba de recuperación elástica



Nota. Equipo usado en la prueba de Recuperación elástica. Obtenido de PINZUAR. (2022). *DISPOSITIVO DE TORSIÓN PARA ASFALTOS.*

<https://www.pinzuar.com.co/pinzuar/es/productos/asfaltos/analisis-de-mezclas-asfalticas/dispositivo-torsion-asfaltos/>

2.2.7 Verificación de requisitos de los betunes modificados

Para verificar que las mezclas de asfalto modificado con polímeros zona adecuadas para usarlas en material impermeabilizante, estas mezclas deben cumplir con los requerimientos propuestos por la norma NTE INEN 2137:98. Estos requerimientos se observan en la Tabla 2. (INEN, 1998)

Tabla 2

Requisitos fisicoquímicos de los másticos modificados (betún modificado con polímeros)

Requisito	Unidad	TIPO I.C.	
		Min.	Max.
Punto de reblandecimiento	°C	110	---
Penetración a 25°C, 100g, 5s	dmm	---	25

Nota. Valores para aprobar un betún modificado. Adaptado de INEN. (1998).

PRODUCTOS DERIVADOS DEL PETROLEO. IMPERMEABILIZANTES. MASTICOS BITUMINOSOS MODIFICADOS. REQUISITOS. En *Normativa Ecuatoriana de Materiales Bituminosos y Bituminosos Modificados*. INEN.

2.3 Polímeros y su relación con el bitumen

2.3.1 Polietileno (PE)

Existen varios tipos de polietileno que pueden ser polimerizados en diferentes procesos. En el ámbito comercial los más cotizados son: polietileno de alta densidad (HDPE, por sus siglas en inglés), polietileno de baja densidad (LDPE, por sus siglas en inglés). En la actualidad, el polietileno lineal de baja densidad (LLDPE, por sus siglas en inglés) y el polietileno de ultra densidad (UHDPE, por sus siglas en inglés) también han sido cotizados. (Ebewele, 2000)

El LDPE es un sólido con cristalinidad parcial con un valor de 50 a 70%. Contienen moléculas ramificada debido a su polimerización de radicales libres. Estas ramas son defectos, por ello, estas ramificaciones tienen un efecto en las propiedades del polímero. Por otra parte, el HDPE es superior en cristalinidad y tiene pocas cadenas laterales, específicamente 1 cada 200 átomos de carbono en su cadena principal. Las propiedades de estos polímeros se detallan en la Tabla 3. (Ebewele, 2000)

Tabla 3*Propiedades del polietileno*

	Polietileno	
	LDPE	HDPE
Gravedad específica	0.912–0.94	0.941–0.965
Cristalinidad (%)	50–70	80–95
Fusión temperatura (°C)	98–120	127–135
Resistencia a la tracción (MPa)	15.2–78.6	17.9–33.1
Módulo de tracción (MPa)	55.1–172	413–1034
Alargamiento en descanso (%)	150–600	20–130
Resistencia al impacto (Izod) (muesca pies-lb / pulg.)	716	0.8–14
Desviación de calor la temperatura (°C a 66 psi)	38–49	60–88

Nota. Propiedades comunes de los polietilenos. Obtenido de Ebewele, R. O. (2000).

Polymer science and technology. CRC press.

Un principal uso del LDPE es como envoltorio de empaques, mientras que el HDPE es usado ampliamente en la creación de cajas, tinas y tanques por moldeo de inyección. En productos donde se desea claridad, flexibilidad y tenacidad se usa el LDPE, asimismo, este polietileno de baja densidad otorga a su empaque alta resistencia al desgarrar, a la humedad y a los productos químicos. Por el contrario, para productos donde se requiere dureza, rigidez, y alta resistencia química se usa el HDPE. (Ebewele, 2000)

Debido a la disponibilidad del material termoplástico PE, este es usado para mezclas con bitumen con el fin de mejorar la viscosidad y rigidez a temperatura ambiente. (Habib, 2013; Isacsson & Lu, 1995)

2.3.2 Estireno-Butadieno-Estireno (SBS)

Para la modificación estructural del bitumen algunos de los polímeros más usados son el Estireno-butadieno-estireno (SBS, por sus siglas en inglés) y el caucho de estireno-butadieno (SBR, por sus siglas en inglés). Estos materiales como el SBS y

SBR al ser clasificados como elastómeros dotan de una propiedad elástica al bitumen. En anteriores investigaciones se determinó que el uso de estos polímeros mejora la flexibilidad a baja temperatura de las mezclas de asfalto, así como una mayor resistencia a la penetración a una temperatura alta. Esto debido a una red tridimensional que se forma en su estructura. (Sengoz & Isikyakar, 2008)

Generalmente la forma de presentación del SBS es en gránulos, pellets o polvo con el que se incorporan a las mezclas de bitumen en un mezclador con cizalla. Estas mezclas son adecuadas para varias aplicaciones en la industria de la construcción. (Sengoz & Isikyakar, 2008)

2.4 Consideraciones para usos de polímeros en mezclas de bitumen

Algunos aspectos a considerar para la selección de un material de mezcla con el bitumen son el rendimiento, costo, disponibilidad y las condiciones del clima al que destinará el producto. Una manera flexible referente a la disponibilidad de materiales se da gracias a los residuos generados anualmente, este es un método económico y respetuoso para el medio ambiente de obtener materiales. (García-Morales et al., 2004; Joohari & Giustozzi, 2020)

En cuanto a la composición de las mezclas de bitumen, estas concentraciones de polímeros tienen gran significancia. Comúnmente, entre el 4 y 6% es la composición aceptable de un polímero en una mezcla de bitumen. Este rango de composición se debe al tema económico y estructural de las mezclas de bitumen, porcentajes mayores son perjudiciales en estos ámbitos. (Polacco et al., 2004)

La cristalinidad del PE inhibe la interacción del polímero en la mezcla de bitumen. Por ello, Las mezclas se realizan a una temperatura superior del punto de fusión de los materiales con un cizallamiento con el fin de mejorar esa interacción. Al enfriarse las

mezclas después de un tiempo, las mejoras mecánicas no se revierten. (Luo & Chen, 2011)

2.4.1 Compatibilidad

Una definición válida para la compatibilidad es condición de dispersión característica para componentes diferentes. Este estado de dispersión varía según la composición, el tipo de polímero y las condiciones de mezclado. Si una compatibilidad se da completamente, la propiedad de viscosidad aumenta significativamente al igual que las propiedades mecánicas. (Isacsson & Lu, 1995)

La incompatibilidad se puede dar por una gran diferencia de densidad entre el bitumen y el polímero. Cuando se da incompatibilidad entre los materiales se produce una segregación de fases que se puede visualizar en la mezcla de bitumen modificado cuando el polímero flota en la mezcla. Otro factor de influencia en la compatibilidad es el contenido del bitumen en asfaltenos y maltenos. Para un bitumen con aromaticidad adecuada la compatibilidad es mejor. (Habib, 2013; Lesueur, 2009; Newman, 1998)

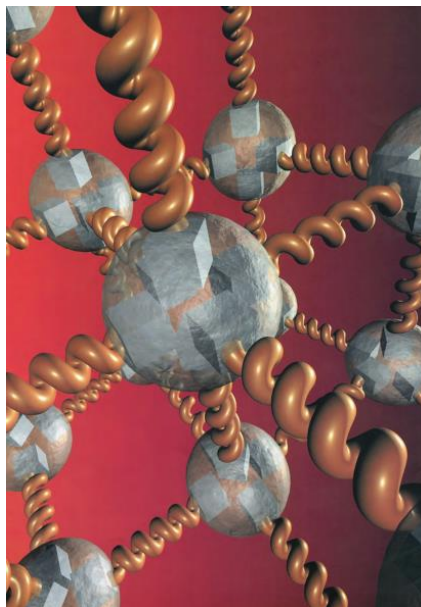
2.5 Modificación de bitumen con polímeros

2.5.1 Modificación de bitumen usando elastómeros termoplásticos

Polímeros olefínicos y estirénicos han demostrado potencial al mezclarse con bitumen. Una red reversible tridimensional se observa en la Figura 6, los enlaces entre cruzados se rompen a altas temperaturas y se forman nuevamente a temperatura ambiente. (Hunter et al., 2015)

Figura 6

Representación esquemática del copolímero SBS en betún: una red polimérica tridimensional a temperatura ambiente



Nota. Red tridimensional de un betún con SBS. Obtenido de Hunter, R. N., Self, A., Read, J., & Hobson, E. (2015). *The shell bitumen handbook*. ICE Publishing London, UK

Una técnica usada para verificar la dispersión y el contenido de un polímero en una matriz de bitumen es la Microscopia. Las moléculas de un polímero se notan al brillar en la matriz oscura del bitumen. Ejemplos de morfología típicas de una mezcla de bitumen modificada con SBS se detallan en las Figuras 7 y 8. La figura 7 muestra una fase rica en polímero al tener 4.5% de concentración, mientras que la Figura 8 muestra una fase rica en bitumen al tener de 2 a 3% de concentración de polímero. (Hunter et al., 2015)

Figura 7

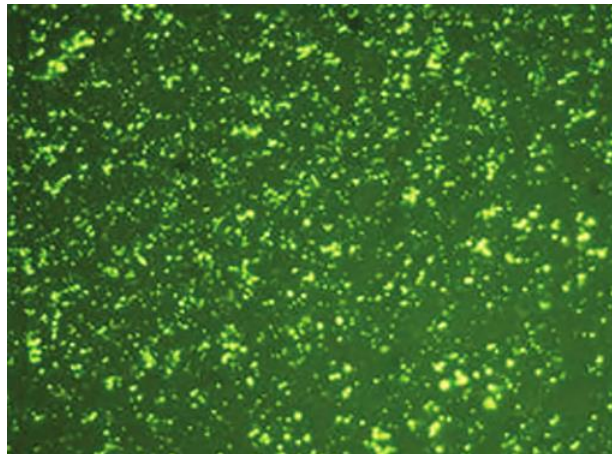
Microscopía de SBS al 4.5 % mezclado con betún



Nota. Las partículas de polímero se notan como puntos con brillo. Obtenido de Hunter, R. N., Self, A., Read, J., & Hobson, E. (2015). *The shell bitumen handbook*. ICE Publishing London, UK

Figura 8

Microscopía de SBS al 3 % mezclado con betún



Nota. Las partículas de polímero se notan como puntos con brillo. Obtenido de Hunter, R. N., Self, A., Read, J., & Hobson, E. (2015). *The shell bitumen handbook*. ICE Publishing London, UK

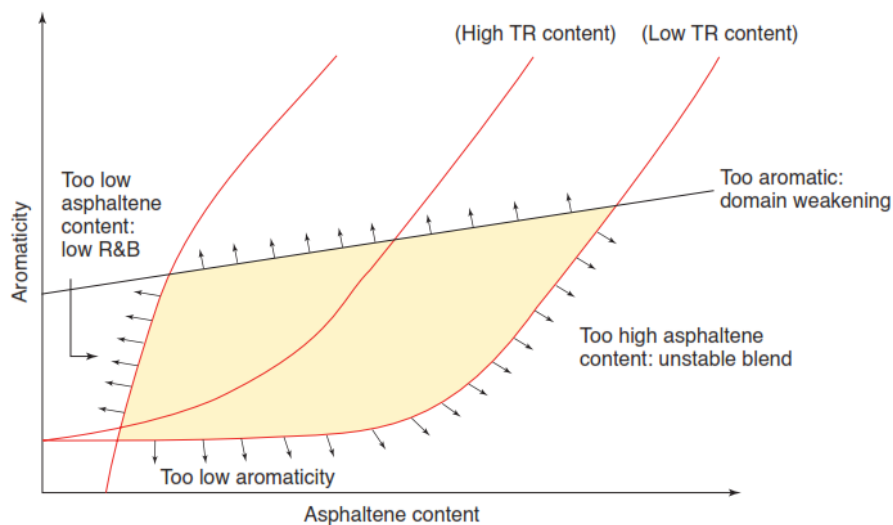
La calidad de dispersión y compatibilidad es influenciada por algunos factores como:

- Para la fracción de maltenos y polímeros, una diferencia de solubilidad
- Contenido y calidad de asfaltenos en el bitumen
- Composición y tipo de polímero en la matriz de bitumen
- Condiciones de mezclado del polímero en el bitumen

En la Figura 9 se puede observar las interacciones de estos factores. Se provoca bajos puntos de reblandecimiento y baja viscosidad con un contenido alto de aromáticos. Además, con bajo contenido de aromáticos, el polímero no se incorpora totalmente lo que provoca baja viscosidad. (Hunter et al., 2015)

Figura 9

Efecto de la aromaticidad y el contenido de asfaltenos en la estabilidad del caucho termoplástico



Nota. La zona roja es óptima para mezclas. Obtenido de Hunter, R. N., Self, A., Read, J., & Hobson, E. (2015). *The shell bitumen handbook*. ICE Publishing London, UK

2.5.2 Modificación de bitumen usando plastómeros

Debido al bajo costo y los beneficios futuros, las poliolefinas son usadas frecuentemente en las mezclas modificadas de bitumen. Las poliolefinas son absorbidas por los componentes ligeros del bitumen y se forma una dispersión. Con altos contenidos de poliolefinas en la matriz de bitumen se produce una inversión de fases. Asimismo, a la naturaleza no polar de las poliolefinas la compatibilidad suele ser pobre, sin embargo, para concentraciones bajas se ha reportado buenos resultados. (Hunter et al., 2015)

2.6 Diseño experimental

2.6.1 Diseño factorial mixto

Para un número diferente de niveles en los factores del diseño se emplea un diseño factorial mixto. Si se da un diseño factorial mixto de 4x3x2 esto significa que se tiene 3 factores con 4, 3 y 2 niveles con un total de 24 tratamientos. El objetivo de este tipo de diseño experimental es analizar todos los niveles. (Humberto & De La Vara, 2008)

2.6.2 Diseño factorial 3^k

Un diseño que tiene k factores con 3 niveles cada factor y tiene 3 tratamientos se considera un diseño factorial 3^k . Para casos como tipo de material el diseño 3^k es ideal al tener tres niveles cada uno. (Humberto & De La Vara, 2008)

2.7 Graficas de efectos estandarizados

2.7.1 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados

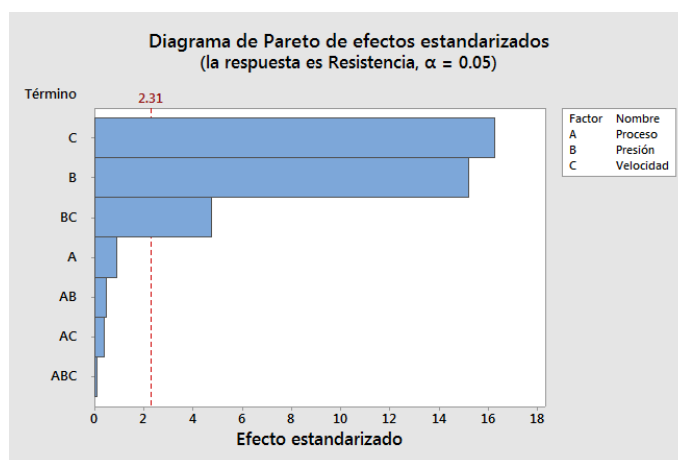
Para un efecto grande hasta un efecto pequeño en una variable es lo que muestra un Diagrama de Pareto. La línea de referencia en el diagrama marca los efectos

significativos si estos pasan de esta línea (que depende del nivel de significancia).

(Minitab, 2022a)

Figura 10

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados



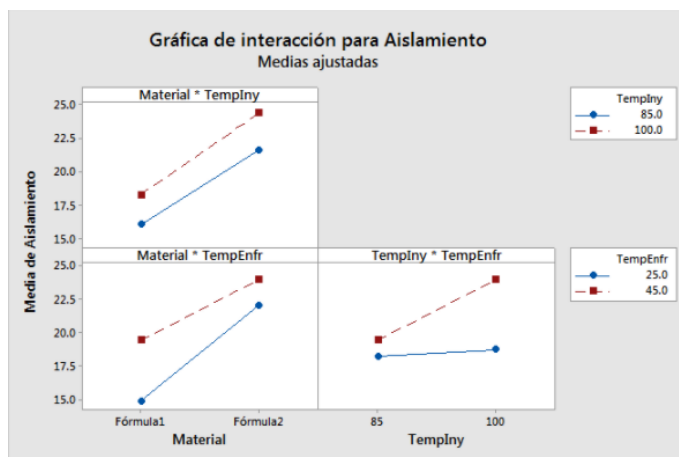
Nota. En el diagrama de Pareto, los efectos que cruzan la línea de marca en 2.31 son estadísticamente significativas. Obtenido de MINITAB. (2022). *Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.*

2.7.2 Gráficas de interacción

La media ajustada de un valor para diferentes factores es lo que muestra la gráfica de interacciones. Además, esta grafica demuestra los efectos aparentes de interacción al no tener líneas paralelas. Esto significa que, al no tener, líneas paralelas, los efectos de interacción entre distintos factores son estadísticamente significativos. (Minitab, 2022b)

Figura 11

Gráficas de interacción



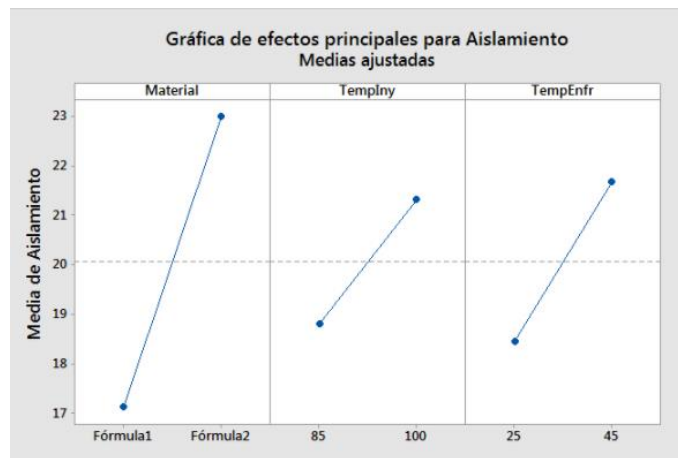
Nota. Ejemplo de interacción de factores entre material, temperatura de enfriamiento y temperatura de inyección versus aislamiento. Obtenido de MINITAB. (2022). *Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.*

2.7.3 Gráficas de efectos principales

Las medias ajustadas para cada nivel y sus variables son mostradas en la gráfica de efectos principales. Cuando las líneas en esta grafica no son de forma horizontal, se dice que hay efectos en todas las variables. Consecuentemente, los efectos principales tienen significancia estadística. (Minitab, 2022b)

Figura 12

Gráficas de efectos principales



Nota. Ejemplo de efectos para los factores de material, temperatura de inyección y temperatura de enfriamiento versus aislamiento. Obtenido de MINITAB. (2022).

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.

Capítulo III

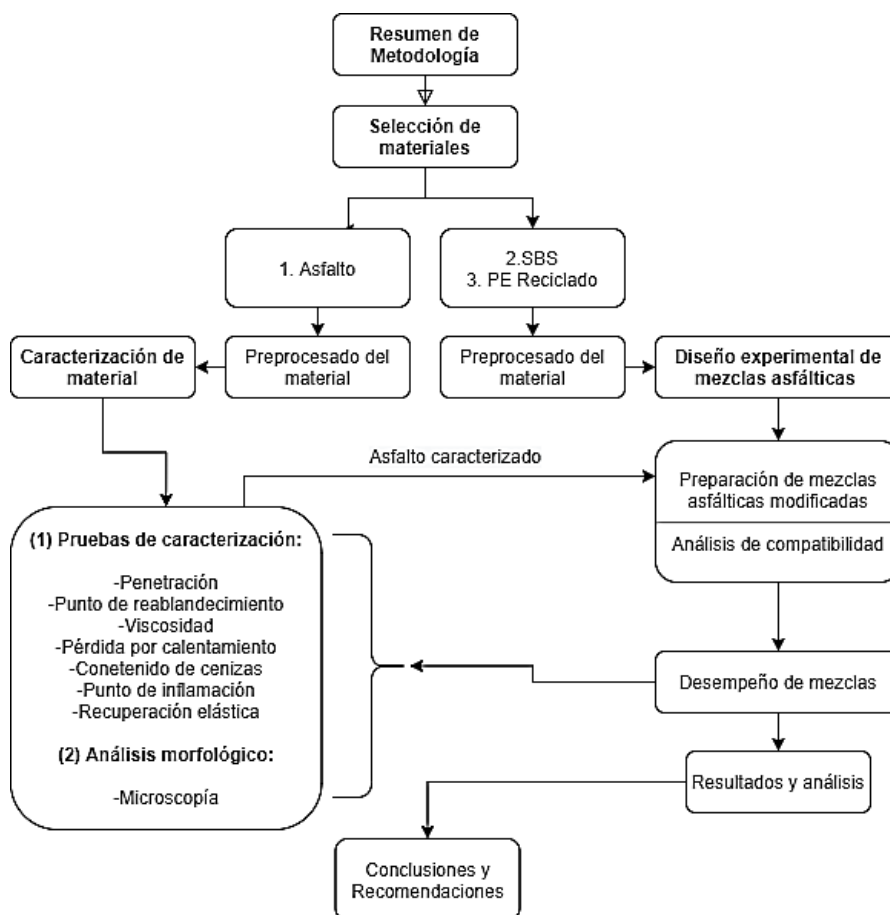
3. Metodología

3.1 Introducción

Para la correcta ejecución del presente trabajo se realiza las actividades basadas en la Figura 13 con el fin de alcanzar los objetivos planteados.

Figura 13

Resumen de la metodología de investigación



En la Figura 13 se detalla el proceso para llevar a cabo la investigación la cual inicia con la obtención de la materia prima como es el asfalto proveniente de la Refinería de Esmeraldas, los polímeros como el SBS dotado por la empresa DYNASOL y el PE reciclado de la empresa PARAISO S.A en la planta IMPTEK. Posterior a ello, se colecta

una muestra de un tanquero de asfalto para caracterizar este material con pruebas fisicoquímicas. Asimismo, se procesa los polímeros, en el caso del SBS este ha sido dotado en forma de pellet mientras que el LDPE y el HDPE tiene que ser cortados y hasta tener pequeños trozos. Estos polímeros cuentan con certificación de sus respectivos proveedores.

Una vez caracterizado el asfalto y los polímeros disponibles para su uso se procede a realizar las mezclas asfálticas según el diseño experimental que se explica más adelante en este capítulo. Luego, con las mezclas asfálticas ya preparadas se encuentra las condiciones de operación óptimas para seguir con la caracterización de estas mezclas con pruebas fisicoquímicas como: Punto de reblandecimiento, penetración, densidad, viscosidad dinámica, Punto de inflamación y recuperación elástica. Estos procedimientos se realizan acorde a las normas ASTM, INEN y UNE como se observa en la Tabla 4. Estas pruebas se explican en la sección 3.5.

Tabla 4

Ensayos de especificación para asfaltos y asfaltos modificados

Ensayo	Normativa	Referencias
Punto de reblandecimiento	ASTM D36/D36M-14 UNE-EN 1427:2015 NTE INEN 920:2013	(ASTM, 2020b)
Penetración	ASTM D5/D5M-20 UNE 104 281-4-2:1986 NTE-INEN-917:2013	(ASTM, 2020a)
Viscosidad dinámica	ASTM D4402/D4402M-15	(ASTM, 2015)
Punto de inflamación	ASTM D92-18 UNE-EN ISO 2592:2018 INEN 808:2013	(ASTM, 2018b)
Recuperación elástica	IRAM 6830 NLT 239-91	(IRAM, 2011)

Al final se realiza una comparación estadística entre las mezclas asfálticas modificadas y se analiza los datos obtenidos según los requisitos que estos deben tener según la normativa INEN.

3.2 Diseño experimental

3.2.1 Diseño factorial mixto para determinar la compatibilidad y las condiciones de trabajo óptimas

El diseño factorial mixto $3 \times 4 \times 2$ para determinar la compatibilidad y las condiciones de trabajo óptimas donde se obtendrá una buena compatibilidad entre el asfalto y polímero se detalla en la Tabla 5, siendo los factores 3 factores: (1) Tipo de polímero, (2) Tiempo de mezcla, (3) Rango de temperatura. Se preparan mezclas de asfalto con polímero de 500 g con una composición mínima de 2.00 % de polímero a diferentes valores de tiempo de mezcla, diferentes rangos de Temperatura (alta y baja) y a una agitación constante de 1000 rpm. La compatibilidad entre asfalto y polímero se evalúa visualmente y mediante microscopía.

Tabla 5

Diseño factorial para determinar la compatibilidad y las condiciones de trabajo óptimas

Experimento	Polímero	Composición	Tiempo de mezcla	Rango de Temperatura
		%	h	°C
A1	SBS	2	0.5	195-205
A2	SBS	2	1	195-205
A3	SBS	2	1.5	195-205
A4	SBS	2	2	195-205
B1	SBS	2	0.5	210-220
B2	SBS	2	1	210-220
B3	SBS	2	1.5	210-220
B4	SBS	2	2	165-175
C1	HDPE	2	0.5	165-175
C2	HDPE	2	1	165-175
C3	HDPE	2	1.5	165-175
C4	HDPE	2	2	165-175
D1	HDPE	2	0.5	175-185
D2	HDPE	2	1	175-185
D3	HDPE	2	1.5	175-185
D4	HDPE	2	2	175-185
E1	LDPE	2	0.5	165-175
E2	LDPE	2	1	165-175
E3	LDPE	2	1.5	165-175
E4	LDPE	2	2	165-175
F1	LDPE	2	0.5	175-185
F2	LDPE	2	1	175-185
F3	LDPE	2	1.5	175-185
F4	LDPE	2	2	175-185

3.2.2 Diseño factorial para analizar las propiedades físico-químicas de las mezclas asfálticas modificadas

Los resultados obtenidos del *diseño factorial mixto 3x4x2 para determinar la compatibilidad y las condiciones de trabajo óptimas* se usan en el *Diseño factorial 3^K* para analizar las propiedades físico-químicas de las mezclas asfálticas modificadas que se detalla en la Tabla 6, siendo los factores: (1) Tipo de polímero, (2) Composición. Se

preparan mezclas de asfalto con polímero de 500 g con composiciones de 2.00, 2.25 y 2.50% de polímero a una agitación y rango de temperatura obtenida del *Diseño experimental para determinar la compatibilidad y las condiciones de trabajo óptimas*.

Tabla 6

Diseño factorial 3² para analizar las propiedades físico-químicas de las mezclas asfálticas modificadas

EXP	POL	Co	PR	PEN	VISC	PI	RE
-	-	%	°C	dmm	cP	°C	%
1	SBS	2.00	-	-	-	-	-
2	SBS	2.25	-	-	-	-	-
3	SBS	2.50	-	-	-	-	-
4	HDPE	2.00	-	-	-	-	-
5	HDPE	2.25	-	-	-	-	-
6	HDPE	2.50	-	-	-	-	-
7	LDPE	2.00	-	-	-	-	-
8	LDPE	2.25	-	-	-	-	-
9	LDPE	2.50	-	-	-	-	-

Nota. EXP: # Experimento, POL: Polímero, Co: Composición, PR: Punto de reblandecimiento, PEN: Penetración, VISC: Viscosidad, PI: Punto de inflamación, RE: Recuperación elástica.

3.3 Caracterización y obtención de materiales

La materia prima esencial es el asfalto proveniente de la Refinería de Esmeraldas., este asfalto es abastecido por tanqueros a la planta principal IMPTEK ubicada en Pífo, del cual se toma una muestra representativa para determinar propiedades físicoquímicas del asfalto según la Tabla 7.

Los resultados se presentan a continuación:

Tabla 7

Resultados de las propiedades fisicoquímicas del asfalto

Propiedad	Unidad	Valor promedio
Punto de reblandecimiento	°C	50.6
Penetración	<i>dmm</i>	68
Punto de inflamación	°C	246
Densidad	<i>g/mL</i>	0.99
Recuperación elástica inicial	%	7.7
Recuperación elástica final	%	9.7
Viscosidad@60°C	<i>cP</i>	281700
Viscosidad@90°C	<i>cP</i>	9117
Viscosidad@135°C	<i>cP</i>	42.5

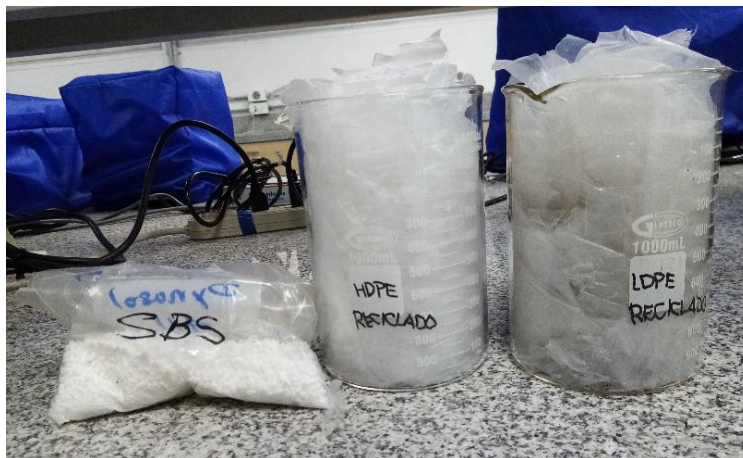
Nota. Los valores se encuentran aptos para clasificar al Asfalto como tipo AC-20.

Los polímeros usando en este trabajo de investigación se obtienen de la empresa DYNASOL siendo este el proveedor del Estireno-Butadieno-Estireno (SBS, por sus siglas en inglés), mientras que el Polietileno de alta densidad (HDPE, por sus siglas en inglés) y el Polietileno de baja densidad (LDPE, por sus siglas en inglés) se los obtiene del reciclaje en la planta IMPTEK.

Para el caso de los polímeros reciclados, estos pasan por un proceso de recolección minuciosa, un lavado, un secado y su posterior corte en pedazos para su uso en las mezclas de asfalto modificado. El SBS por otro lado se encuentra en pellets lo que facilita su uso. Tanto el SBS como los polietilenos poseen certificados de calidad que avalan su composición y su calidad. A continuación, se observan lo polímeros ya listos para su uso en la elaboración de mezclas de asfalto modificado:

Figura 14

Polímeros usados en el trabajo de investigación



Nota. Se observan de izquierda a derecha el SBS en pellets, el HDPE reciclado en pedazos, y el LDPE reciclado en pedazos.

3.4 Preparación de mezclas de asfalto modificado

Se preparan mezclas de asfalto con polímero con una base de 500 g. Cada mezcla de asfalto se prepara con composición de 2.00, 2.25 y 2.50% de polímero. Para la elaboración de una mezcla primero se calienta el asfalto en una hornilla hasta que esta se encuentre en estado líquido. Se fija la hornilla y el recipiente caliente en el equipo de mezclado marca ROSS. Después, se sumerge el disco de homogenización tipo cizalla y la termocupla en el recipiente. Se fijan las condiciones de operación del equipo con 1000 rpm.

Posterior a ello se acciona el equipo y se eleva gradualmente la temperatura hasta llegar al rango especificado en el diseño experimental en la Tabla 4. Una vez alcanzado este rango de temperatura se adiciona poco a poco el material modificante, es decir, la masa de polímero que se usará en el recipiente con el asfalto líquido y caliente. Una vez bien mezclado el asfalto con el polímero se procede al análisis de compatibilidad y

dispersión de las mezclas de asfalto modificado. Este proceso se realiza hasta 120 minutos para cada mezcla.

3.5 Análisis de compatibilidad y dispersión de las mezclas de asfalto modificado

Para determinar la compatibilidad y dispersión del asfalto con los polímeros, se extrae cada 30 minutos una muestra de la mezcla de asfalto modificado. Estas muestras se las coloca sobre papel siliconado para realizar un frotis longitudinal y transversal con la ayuda de una espátula caliente. A estas muestras se realiza el frotis longitudinal y transversal para colocarlas en un portaobjetos para su inspección en un microscopio.

El análisis de microscopia se realiza con cada muestra obtenida desde los 30 minutos de inicio de mezclado hasta los 120 minutos que termina la mezcla. Se usa lentes de aumento desde $5x$ a $100x$. Lo que se determina es la dispersión de las partículas de los polímeros en la matriz de asfalto, estas partículas se diferencian en las imágenes al tener figura redonda y transparente.

A continuación, se presentan los resultados:

Tabla 8

Resultados de Microscopía SBS 2%, T= 195-205 °C, Agitación=1000 rpm

#	Tipo	Tiempo de mezcla			
		0.5h	1h	1.5h	2h
5x	L				
	T				
10x	L				
	T				
20x	L				
	T				
40x	L				
	T				
100x	L				
	T				

Nota. L=longitudinal, T=Transversal

Tabla 9

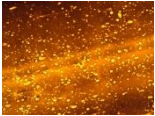
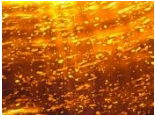
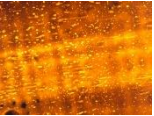
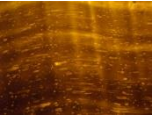


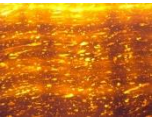







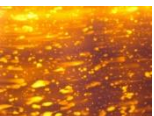










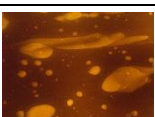
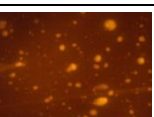
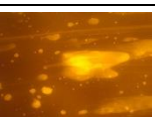
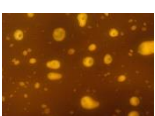









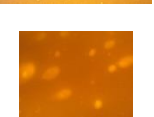

Resultados de Microscopía SBS 2%, T= 210-220 °C, Agitación=1000 rpm

#	Tipo	Tiempo de mezcla			
		0.5h	1h	1.5h	2h
5x	L				
	T				
10x	L				
	T				
20x	L				
	T				
40x	L				
	T				
100x	L				
	T				

Nota. L=longitudinal, T=Transversal

Tabla 10

Resultados de Microscopía LDPE 2%, T= 165-175 °C, Agitación=1000 rpm

#	Tipo	Tiempo de mezcla			
		0.5h	1h	1.5h	2h
5x	L				
	T				
10x	L				
	T				
20x	L				
	T				
40x	L				
	T				
100x	L				
	T				

Nota. L=longitudinal, T=Transversal

Tabla 11

Resultados de Microscopía LDPE 2%, T= 175-185 °C, Agitación=1000 rpm

#	Tipo	Tiempo de mezcla			
		0.5h	1h	1.5h	2h
5x	L				
	T				
10x	L				
	T				
20x	L				
	T				
40x	L				
	T				
100x	L				
	T				

Nota. L=longitudinal, T=Transversal

Tabla 12

Resultados de Microscopía LDPE 2%, T= 165-175 °C, Agitación=1000 rpm

#	Tipo	Tiempo de mezcla			
		0.5h	1h	1.5h	2h
5x	L				
	T				
10x	L				
	T				
20x	L				
	T				
40x	L				
	T				
100x	L				
	T				

Nota. L=longitudinal, T=Transversal

Tabla 13

Resultados de Microscopía LDPE 2%, T= 175-185 °C, Agitación=1000 rpm

#	Tipo	Tiempo de mezcla			
		0.5h	1h	1.5h	2h
5x	L				
	T				
10x	L				
	T				
20x	L				
	T				
40x	L				
	T				
100x	L				
	T				

Nota. L=longitudinal, T=Transversal

En la Tabla 8 y 9 se puede observar la microscopía de la mezcla asfáltica modificada con SBS al 2%. Para un rango de temperatura inferior y tiempo de 2 horas se ha obtenido un mejor resultado de dispersión de las partículas de SBS, por lo tanto, estas son las condiciones idóneas para la preparación de la mezcla de asfalto modificado. Cabe recalcar que, para el rango de temperatura superior, la mezcla asfáltica modificado emanaba olor a un producto chamuscado y en su microscopía presentaba partículas de polímero quemadas.

En la Tabla 10 y 11 se puede observar la microscopía de la mezcla asfáltica modificada con LDPE al 2%. Para un rango de temperatura inferior y tiempo de 1.5 horas se ha obtenido un mejor resultado de dispersión de las partículas de LDPE, por lo tanto, estas son las condiciones idóneas para la preparación de la mezcla de asfalto modificado. Cabe recalcar que no hay una diferencia significativa en la dispersión de las partículas del polímero comparando el rango alto y bajo de temperatura con el que se testeó la prueba.




En la Tabla 12 y 13 se puede observar la microscopía de la mezcla asfáltica modificada con HDPE al 2%. Para un rango de temperatura inferior y tiempo de 1.5 horas se ha obtenido un mejor resultado de dispersión de las partículas de HDPE, por lo tanto, estas son las condiciones idóneas para la preparación de la mezcla de asfalto modificado. Cabe recalcar que no hay una diferencia significativa en la dispersión de las partículas del polímero comparando el rango alto y bajo de temperatura con el que se testeó la prueba.

Finalmente, después de un reposo de 24 horas de la mezcla asfáltica modificada se determina si esta tiene una separación de fases. El procedimiento para la realización de esta prueba es el calentar la muestra y con la ayuda de una espátula verificar si existen grumos o partes no disueltas del polímero en la matriz de asfalto. Los resultados de

esta prueba han sido positivos al mostrar una mezcla homogénea como se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 14

Resultados de la prueba de homogeneidad

SBS	LDPE	HDPE
		

Nota. Elaboración propia. No se observa gránulos o películas de polímero en la matriz de bitumen.

3.6 Ensayos de especificación para asfalto y mezclas de asfalto modificado

3.6.1 Punto de reblandecimiento

Para la realización de la prueba de reblandecimiento se calienta el material hasta que esta se encuentra líquida. La muestra líquida y caliente se vierte sobre 2 anillos en una superficie plana con papel siliconado y se los deja reposar hasta que vuelva a su estado sólido. Luego, con la ayuda de un estilete caliente se refilan las imperfecciones de la muestra ya sólida en los anillos hasta que ninguna parte de la muestra sobresalga de los anillos y que la superficie sea plana.

A estos anillos ya refileados se les coloca las guías de centro para las bolas de acero. Se ajustan adecuadamente las guías y se colocan las bolas de acero en la superficie de los anillos con la muestra justo en el centro. Después, en la máquina de punto de reblandecimiento se coloca un vaso de precipitación de 600 mL lleno de agua (si se evalúa bitumen) o lleno de glicerina (si se evalúa una mezcla asfáltica) a temperatura ambiente.

Finalmente, se fijan los anillos junto con las guías en el soporte, se coloca el soporte dentro del vaso con el líquido adecuado y se fija la termocupla para iniciar con la prueba. La determinación del punto de reblandecimiento se visualiza como la media de las temperaturas en la cada bola de ambos discos cae a una distancia de 25 mm siendo esto detectado por un sensor calibrado.

Los resultados se presentan a continuación:

Tabla 15*Resultados de la prueba de punto de reblandecimiento*

Orden Est	OrdenCo rrida	Tip oPt	Bloq ues	Polím ero	Porcentaje de polímero (%)	Punto de Reblandecimiento (°C)
1	8	1	1	SBS	2	64.2
2	6	1	1	SBS	2.25	65.7
3	4	1	1	SBS	2.5	66.3
4	7	1	1	HDPE	2	74.7
5	2	1	1	HDPE	2.25	77.8
6	1	1	1	HDPE	2.5	94.3
7	5	1	1	LDPE	2	58.8
8	3	1	1	LDPE	2.25	63.9
9	9	1	1	LDPE	2.5	67.8
10	18	1	2	SBS	2	64.4
11	10	1	2	SBS	2.25	65.8
12	14	1	2	SBS	2.5	66.6
13	15	1	2	HDPE	2	75.4
14	17	1	2	HDPE	2.25	77
15	13	1	2	HDPE	2.5	94.3
16	11	1	2	LDPE	2	59.2
17	12	1	2	LDPE	2.25	64.2
18	16	1	2	LDPE	2.5	67.8

3.6.2 Penetración

Para la realización de la prueba de penetración se calienta el material hasta que esta se encuentra líquida. La muestra líquida y caliente se vierte en un envase cilíndrico metálico para penetraciones debajo de 200 según la norma ASTM. Se los deja reposar hasta que vuelva a su estado sólido.

Luego, se coloca el contenedor con la muestra en un baño termostático a 25°C durante 60 minutos. Una vez concluido el tiempo de reposo, se retira el contenedor de la muestra y se lo coloca en la base del penetrómetro para su prueba. Las condiciones de prueba para el penetrómetro son 100 g de carga con un tiempo de 5 segundos. Se

ajusta la aguja, se tara el equipo y se acciona la carga. Este procedimiento se lo repite 3 veces. La determinación de la penetración del material se expresa como decimas de milímetro (dmm) siendo esto visualizado en el penetrómetro.

Los resultados se presentan a continuación:

Tabla 16

Resultados de la prueba de penetración

Orden Est	OrdenCorrida	Tipo Pt	Bloques	Polímero	Porcentaje de polímero (%)	Penetración (dmm)
1	20	1	1	SBS	2	47
2	23	1	1	SBS	2.25	43
3	19	1	1	SBS	2.5	40
4	21	1	1	HDPE	2	43
5	27	1	1	HDPE	2.25	39
6	24	1	1	HDPE	2.5	35
7	22	1	1	LDPE	2	55
8	26	1	1	LDPE	2.25	45
9	25	1	1	LDPE	2.5	41
10	14	1	2	SBS	2	47
11	13	1	2	SBS	2.25	45
12	15	1	2	SBS	2.5	41
13	12	1	2	HDPE	2	43
14	16	1	2	HDPE	2.25	40
15	17	1	2	HDPE	2.5	37
16	18	1	2	LDPE	2	55
17	10	1	2	LDPE	2.25	44
18	11	1	2	LDPE	2.5	41
19	1	1	3	SBS	2	47
20	5	1	3	SBS	2.25	44
21	4	1	3	SBS	2.5	41
22	8	1	3	HDPE	2	45
23	6	1	3	HDPE	2.25	40
24	3	1	3	HDPE	2.5	36
25	9	1	3	LDPE	2	57
26	2	1	3	LDPE	2.25	46
27	7	1	3	LDPE	2.5	41

3.6.3 Densidad

Para la determinación de la densidad se calienta el material hasta que esta se encuentra líquida. La muestra líquida y caliente se vierte en un contenedor de $15\text{cm} \times 15\text{cm} \times 1\text{cm}$ de papel siliconado hasta obtener un espesor de $5 \pm 2\text{mm}$. Se deja reposar la masa hasta que vuelva a su estado sólido. Luego, con la ayuda de un estilete caliente se corta 3 pedazos de $5\text{cm} \times 5\text{cm}$. Una vez obtenidos los 3 pedazos, se coloca papel siliconado sobre una balanza analítica. Se pesa cada uno de los pedazos para obtener su masa (M) en gramos.

Luego, para la obtención del volumen mediante el principio de Arquímedes se coloca un vaso de precipitación de 600 mL lleno de agua sobre la balanza analítica y se tara. Se coloca frente a la balanza un soporte universal que lleva una aguja metálica donde se colocaran los pedazos los cuales ya se determinó la masa previamente.

Se sumerge el pedazo de muestra suspendido en la aguja metálica y se toma el valor del volumen (V) en mililitros. Una vez obtenidos los valores de masa y volumen se usa la fórmula de la densidad $\rho = M/V$, la densidad está expresada en g/mL . Este procedimiento se repite 3 veces para cada material.

Los resultados se presentan a continuación:

Tabla 17*Resultados de la prueba de densidad*

Orden Est	OrdenCorrida	Tipo Pt	Bloques	Polímero	Porcentaje de Polímero (%)	Densidad (g/mL)
1	20	1	1	SBS	2	0.99
2	23	1	1	SBS	2.25	1.00
3	19	1	1	SBS	2.5	1.00
4	21	1	1	HDPE	2	0.99
5	27	1	1	HDPE	2.25	1.00
6	24	1	1	HDPE	2.5	1.00
7	22	1	1	LDPE	2	0.98
8	26	1	1	LDPE	2.25	1.00
9	25	1	1	LDPE	2.5	0.99
10	14	1	2	SBS	2	1.00
11	13	1	2	SBS	2.25	0.99
12	15	1	2	SBS	2.5	1.00
13	12	1	2	HDPE	2	0.99
14	16	1	2	HDPE	2.25	1.00
15	17	1	2	HDPE	2.5	1.00
16	18	1	2	LDPE	2	1.00
17	10	1	2	LDPE	2.25	0.99
18	11	1	2	LDPE	2.5	0.99
19	1	1	3	SBS	2	1.00
20	5	1	3	SBS	2.25	1.00
21	4	1	3	SBS	2.5	1.00
22	8	1	3	HDPE	2	0.99
23	6	1	3	HDPE	2.25	1.01
24	3	1	3	HDPE	2.5	1.01
25	9	1	3	LDPE	2	0.99
26	2	1	3	LDPE	2.25	0.99
27	7	1	3	LDPE	2.5	0.99

3.6.4 Punto de inflamación

Para la realización de la prueba de reblandecimiento se calienta el material hasta que esta se encuentra líquida. La muestra líquida y caliente se vierte en la copa hasta que tope una marca que marca aproximadamente 70 mL de muestra. Luego, se coloca la termocupla dentro de la muestra y la llama de prueba debe encender hasta que esta

tenga entre 3.2 y 4.8 *mm*. Se enciende el equipo y se gira la perilla de la resistencia térmica para que esta caliente de 5 a 17°C por minuto.

Cuando la temperatura llegue a tener 56°C por debajo del punto de inflamación se debe ajustar la perilla de la resistencia térmica hasta que esta caliente de 5 a 6°C por minuto. En este tiempo restante, se debe pasar la llama de prueba por el centro de la copa cada 2°C. La llama inducida en la prueba hace que los componentes volátiles de la muestra se prendan. La temperatura a la que se enciende por primera vez se descarta y la segunda temperatura a la que se enciende la muestra se toma como el valor de punto de inflamación.

Los resultados se presentan a continuación:

Tabla 18

Resultados de la prueba de inflamación

Orden Est	OrdenCoo rrida	Tip oPt	Bloq ues	Polím ero	Porcentaje de polímero (%)	Punto de Inflamación (°C)
1	8	1	1	SBS	2	256
2	6	1	1	SBS	2.25	257
3	4	1	1	SBS	2.5	258
4	7	1	1	HDPE	2	232
5	2	1	1	HDPE	2.25	234
6	1	1	1	HDPE	2.5	240
7	5	1	1	LDPE	2	200
8	3	1	1	LDPE	2.25	208
9	9	1	1	LDPE	2.5	210
10	18	1	2	SBS	2	256
11	10	1	2	SBS	2.25	257
12	14	1	2	SBS	2.5	258
13	15	1	2	HDPE	2	232
14	17	1	2	HDPE	2.25	234
15	13	1	2	HDPE	2.5	240
16	11	1	2	LDPE	2	202
17	12	1	2	LDPE	2.25	210
18	16	1	2	LDPE	2.5	214

3.6.5 Recuperación elástica

Para la realización de la prueba de reblandecimiento primero se verifica el estado del equipo calibrando la base del recipiente de la muestra para que este tenga una separación de 20 mm con el émbolo y ajustando los apoyos para que tengo una libre rotación. Luego, se inserta la varilla a través del émbolo y se prepara la mezcla líquida. Se calienta el material hasta que esta se encuentra líquida.

La muestra líquida y caliente se vierte en el recipiente hasta que se llene a 2mm del tope de la superficie. Se coloca el recipiente en la base del equipo y se sumerge el émbolo para después ajustarlo y girando la varilla a la posición de 0°, es decir la punta del indicador de grados se queda en 180°. Esta posición se mantiene durante mínimo 60 minutos. Después, se coloca todo el conjunto del equipo en un baño termostático a $25 \pm 0.2 \text{ } ^\circ\text{C}$ durante 90 minutos.

Concluido este tiempo se retira el conjunto del baño termostático y se lo coloca en una superficie plana accionando la varilla para que el indicador de grados se coloque en 0°, esta acción debe ocurrir entre 3 y 5 segundos. Una vez que llega el indicador a la marca de 0° se retira la varilla y se cronometra 30 segundos para la toma del primer valor del ángulo recuperado (α_1). Finalmente, a los 30 minutos se toma el segundo valor del ángulo recuperado (α_2). La recuperación elástica inicial se determina con la fórmula $R_i = \alpha_1 * 100/180$, mientras que la recuperación elástica total se determina con la fórmula $R_T = \alpha_2 * 100/180$.

Los resultados se presentan a continuación:

Tabla 19*Resultados de la prueba de recuperación elástica*

Orden Est	OrdenCo rrida	Tip oPt	Bloq ues	Polím ero	Porcentaje de polímero (%)	Recuperación elástica (%)
1	8	1	1	SBS	2	30.56
2	6	1	1	SBS	2.25	31.67
3	4	1	1	SBS	2.5	32.22
4	7	1	1	HDPE	2	8.33
5	2	1	1	HDPE	2.25	8.33
6	1	1	1	HDPE	2.5	7.78
7	5	1	1	LDPE	2	7.78
8	3	1	1	LDPE	2.25	7.78
9	9	1	1	LDPE	2.5	7.78
10	18	1	2	SBS	2	30.56
11	10	1	2	SBS	2.25	31.67
12	14	1	2	SBS	2.5	32.22
13	15	1	2	HDPE	2	11.11
14	17	1	2	HDPE	2.25	11.11
15	13	1	2	HDPE	2.5	7.78
16	11	1	2	LDPE	2	8.89
17	12	1	2	LDPE	2.25	10.56
18	16	1	2	LDPE	2.5	7.78

3.6.6 Viscosidad

Para la realización de la prueba de viscosidad se pesa una muestra sólida del material. La masa de este material se calcula con la densidad obtenida previamente multiplicada por 10. Se introduce la masa en el tubo de testeo de la muestra. Luego, el tubo se introduce en una celda térmica acoplada al viscosímetro rotacional. Se eleva la temperatura al primer punto de testeo y se deja reposar hasta que el material se encuentre en estado líquido.

Finalmente, se selecciona el husillo según la viscosidad esperada, en este caso el husillo #28. Las condiciones de trabajo del viscosímetro rotacional usado es un tiempo

de 20 minutos. Este procedimiento se repite para cada material en un rango de 125 a 175°C.

Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 20

Resultados de la prueba de viscosidad de 125 a 145°C

Orden Est	Polím ero	Porc Pol (%)	Viscosidad@12 5°C (cP)	Viscosidad@13 5°C (cP)	Viscosidad@14 5°C (cP)
1	SBS	2	1887.0	1103.2	809.6
2	SBS	2.25	2285.0	1316.0	954.2
3	SBS	2.5	2835.0	1592.0	980.0
4	HDPE	2	3640.0	1970.0	1100.0
5	HDPE	2.25	4360.0	2240.0	1260.0
6	HDPE	2.5	5760.0	2730.0	1550.0
7	LDPE	2	3220.0	1670.0	960.0
8	LDPE	2.25	3300.0	1750.0	995.0
9	LDPE	2.5	3540.0	1900.0	1105.0

Tabla 21

Resultados de la prueba de viscosidad de 155 a 175°C

Orden Est	Polím ero	Porc Pol (%)	Viscosidad@15 5°C (cP)	Viscosidad@16 5°C (cP)	Viscosidad@17 5°C (cP)
1	SBS	2	433.0	284.5	230.4
2	SBS	2.25	512.5	338.8	253.1
3	SBS	2.5	620.0	415.0	277.5
4	HDPE	2	605.0	415.0	265.0
5	HDPE	2.25	820.0	517.5	352.5
6	HDPE	2.5	920.0	580.0	387.5
7	LDPE	2	575.0	375.0	247.5
8	LDPE	2.25	602.5	412.5	292.5
9	LDPE	2.5	667.5	440.0	297.5

Capítulo IV

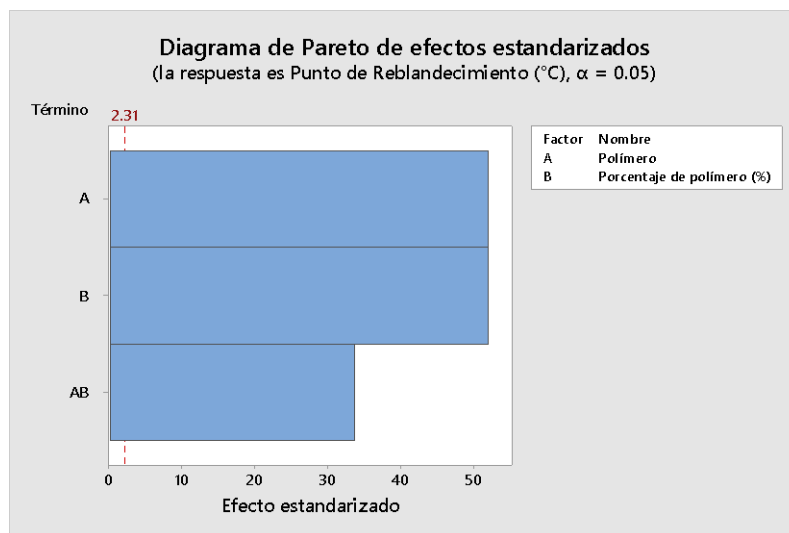
4. Análisis y Discusión de Resultados

4.1 Punto de reblandecimiento

En la figura 15 se encuentra el diagrama de Pareto para Punto reblandecimiento. Al analizar esta figura se puede denotar que tanto el tipo de polímero como el porcentaje de polímero son variables de importancia para una mezcla de asfalto modificado.

Figura 15

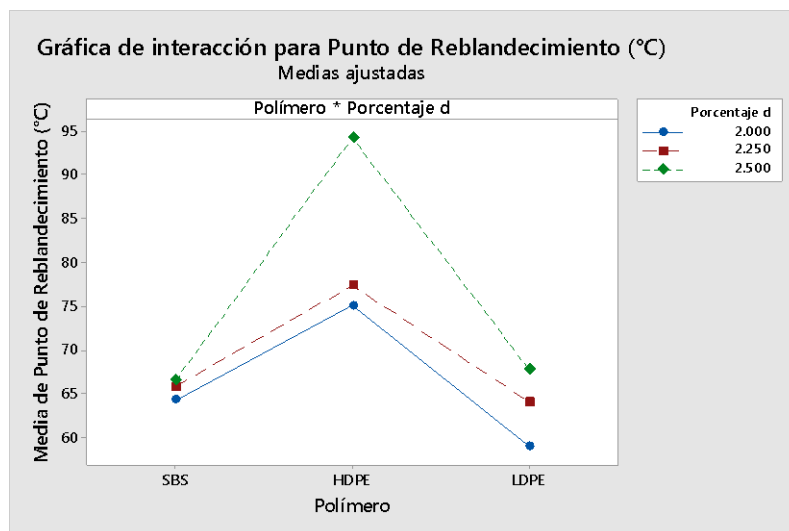
Diagrama de Pareto para Punto de reblandecimiento



En la figura 16 se muestra la gráfica de interacciones para Punto de reblandecimiento en función del tipo de polímero y porcentaje de polímero. Esta gráfica detalla los efectos aparentes de las interacciones ya que las líneas no son paralelas. Esto implica que la relación entre el Punto de reblandecimiento y cada factor depende de la configuración de otro factor. Al analizar los resultados, los efectos de interacción polímero*porcentaje de polímero estos son estadísticamente significativos.

Figura 16

Gráfica de interacción para Punto de reblandecimiento

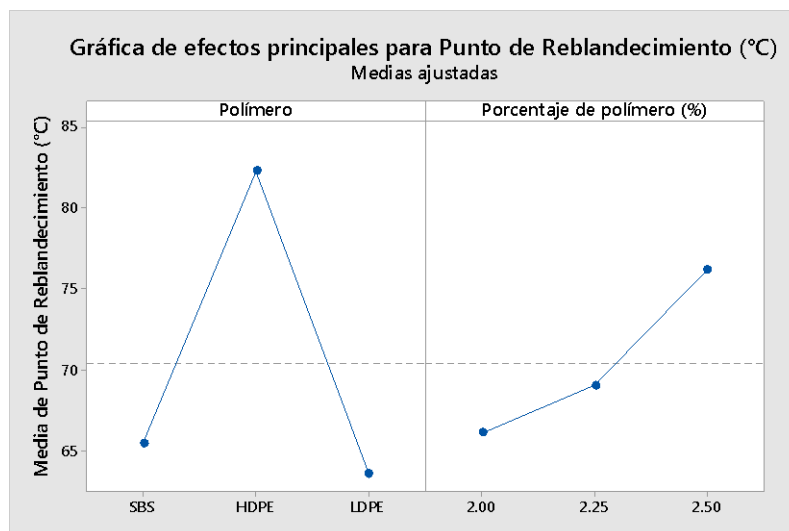


En la figura 17 se muestra la gráfica de efectos para Punto de reblandecimiento. Debido a que las líneas no se encuentran de forma horizontal, existen efectos principales en las variables de tipo de polímero y porcentaje de polímero. Analizando los resultados, los efectos principales son significativos.

Los resultados nos indican que para el Punto de Reblandecimiento las mezclas de asfalto modificado con LDPE tiene el valor más bajo con la composición de 2.00% del polímero, sin embargo, a medida que este aumenta su porcentaje de polímero en el asfalto sus valores de punto de reblandecimiento aumentan. Asimismo, se tienen valores intermedios con las mezclas de asfalto modificado con SBS, este material demostrando que al incrementar su composición en la mezcla tiene un leve aumento en el valor del punto de reblandecimiento. Por último, valores más altos en relación a su composición en mezcla lo tienen las mezclas modificadas con HDPE, siendo el valor más alto con la composición de 2.50%.

Figura 17

Gráfica de efectos para Punto de reblandecimiento



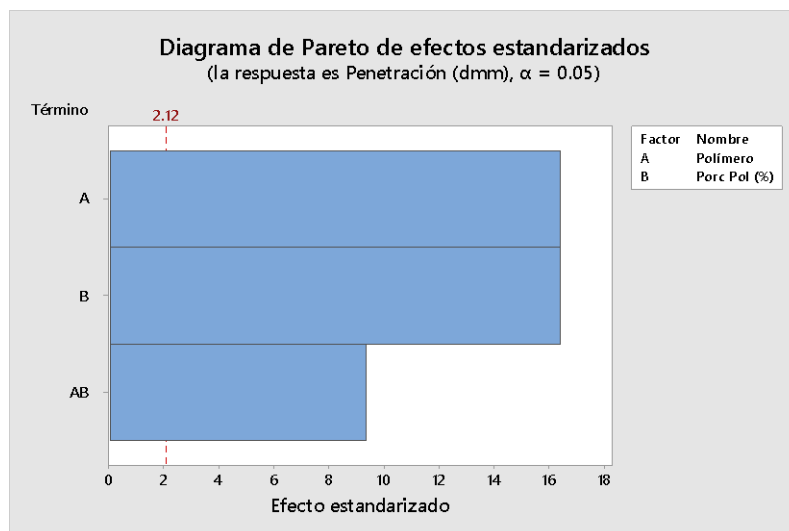
4.2 Penetración

En la figura 18 se encuentra el diagrama de Pareto para Penetración. Al analizar esta figura se puede denotar que tanto el tipo de polímero como el porcentaje de polímero son variables de importancia para una mezcla de asfalto modificado.

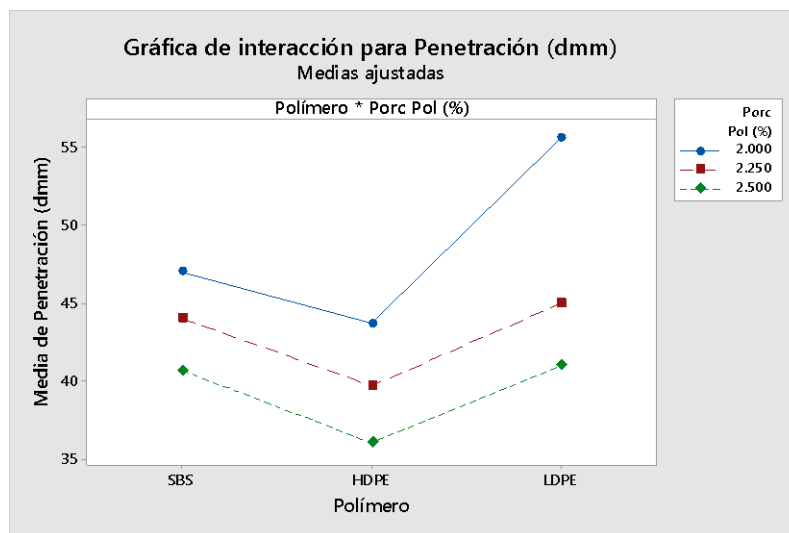
En la figura 19 se muestra la gráfica de interacciones para Penetración en función del tipo de polímero y porcentaje de polímero. Esta gráfica detalla los efectos aparentes de las interacciones ya que las líneas no son paralelas. Esto implica que la relación entre la Penetración y cada factor se atribuye a la configuración de un factor diferente. Al analizar los resultados, los efectos de interacción polímero*porcentaje de polímero estos son estadísticamente significativos.

Figura 18

Diagrama de Pareto para Penetración

**Figura 19**

Gráfica de interacción para Penetración

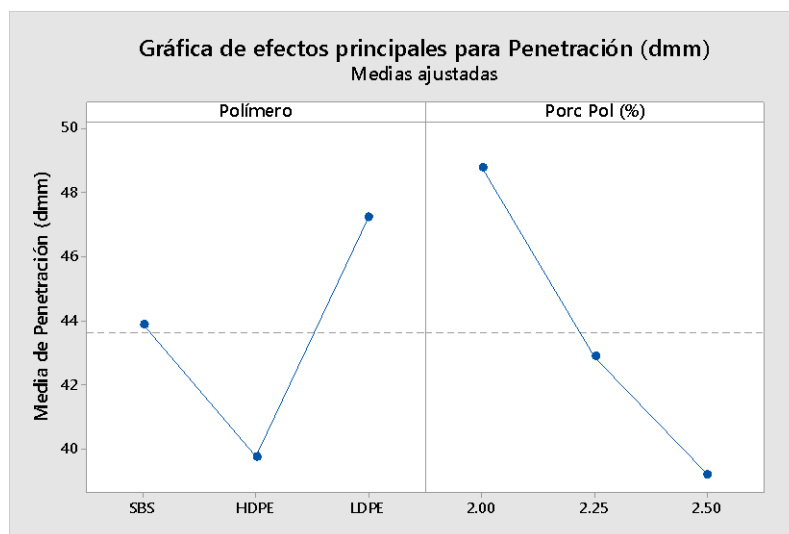


En la figura 20 se muestra la gráfica de efectos para Penetración. Debido a que las líneas no se encuentran de forma horizontal, existen efectos principales en las variables de tipo de polímero y porcentaje de polímero. Analizando los resultados, los efectos principales son significativos.

Los resultados nos indican que para la Penetración las mezclas de asfalto modificado con HDPE tiene el valor más bajo con la composición de 2.50% del polímero, sin embargo, a medida que este disminuye su porcentaje de polímero en el asfalto sus valores de penetración aumentan. Asimismo, se tienen valores intermedios con las mezclas de asfalto modificado con SBS, este material demostrando que al disminuir su composición en la mezcla tiene un leve aumento en el valor de penetración. Por último, valores más altos en relación a su composición en mezcla lo tienen las mezclas modificadas con LDPE, siendo el valor más alto con la composición de 2.00%.

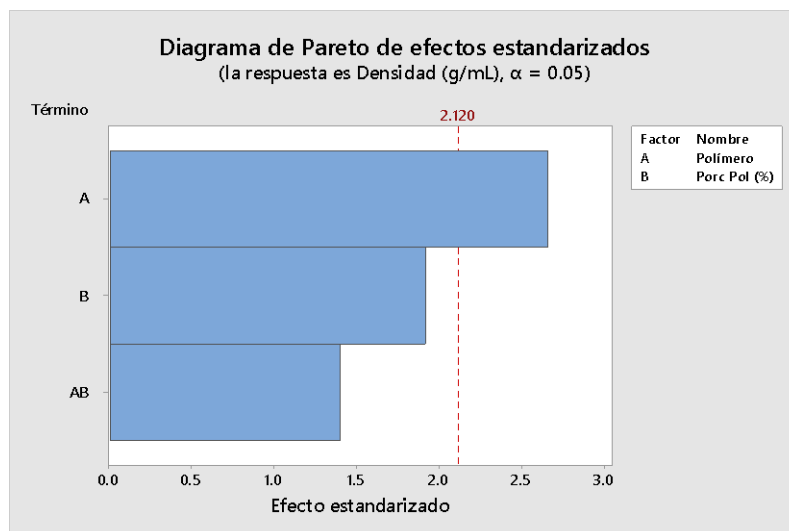
Figura 20

Gráfica de efectos para Penetración



4.3 Densidad

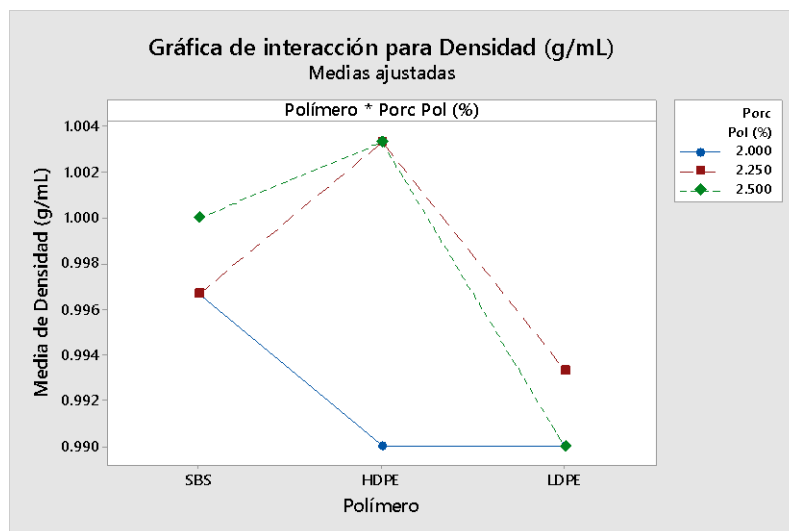
En la figura 21 se encuentra el diagrama de Pareto para Densidad. Al analizar esta figura se puede denotar que solo el tipo de polímero tiene significancia como variable mientras que el porcentaje de polímero no es de gran importancia para una mezcla de asfalto modificado.

Figura 21*Diagrama de Pareto para Densidad*

En la figura 22 se muestra la gráfica de interacciones para Densidad en función del tipo de polímero y porcentaje de polímero. Esta gráfica detalla los efectos aparentes de las interacciones ya que las líneas no son paralelas. Esto implica que la relación entre la Penetración y cada factor depende de la configuración de otro factor. Al analizar los resultados, los efectos de interacción polímero*porcentaje de polímero estos son estadísticamente significativos.

Figura 22

Gráfica de interacción para Densidad

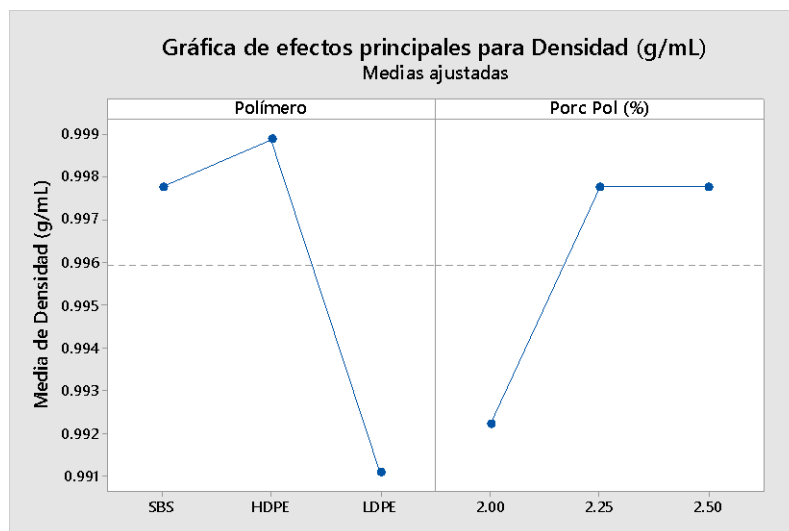


En la figura 23 se muestra la gráfica de efectos para Penetración. Existen efectos principales en las variables de tipo de polímero y porcentaje de polímero, sin embargo, debido a que existe una línea horizontal esto implica un resultado no significativo para valores con porcentaje de polímero entre 2.25 y 2.50%.

Los resultados nos indican que para la Densidad no tiene gran significancia las variables de tipo de polímero y porcentaje de polímero. Esto se debe a que los valores difieren en un grado de una milésima la compararlo entre las variables inferior y superiores.

Figura 23

Gráfica de efectos para Densidad



4.4 Punto de inflamación

En la figura 24 se encuentra el diagrama de Pareto para Punto de Inflamación. Al analizar esta figura se puede denotar que tanto el tipo de polímero como el porcentaje de polímero son variables de importancia para una mezcla de asfalto modificado.

En la figura 25 se muestra la gráfica de interacciones para Punto de inflamación en función del tipo de polímero y porcentaje de polímero. Esta gráfica detalla los efectos aparentes de las interacciones ya que las líneas no son paralelas. Esto implica que la relación entre el Punto de inflamación y cada factor depende de la configuración de otro factor. Al analizar los resultados, los efectos de interacción polímero*porcentaje de polímero estos son estadísticamente significativos.

Figura 24

Diagrama de Pareto para Punto de Inflamación

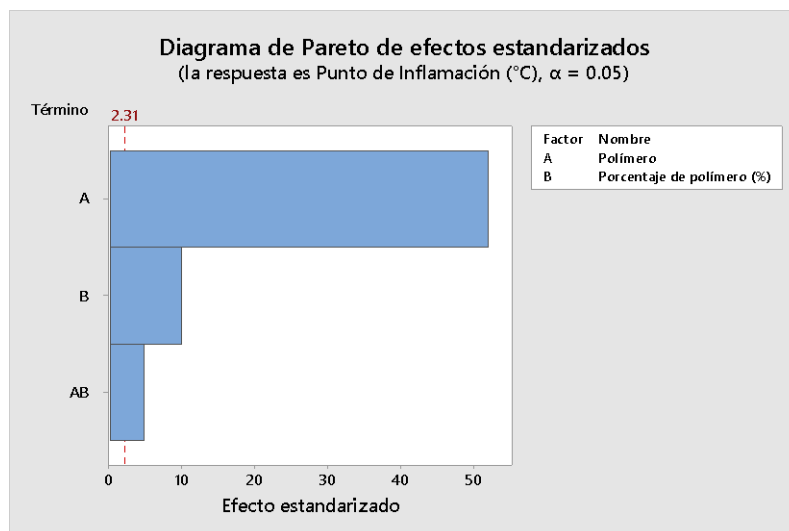
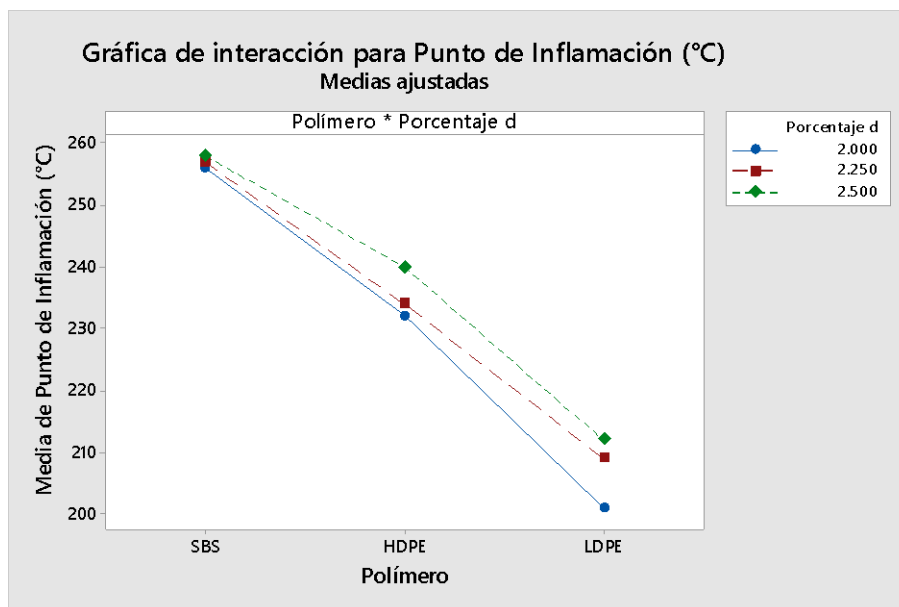


Figura 25

Gráfica de interacción para Punto de inflamación



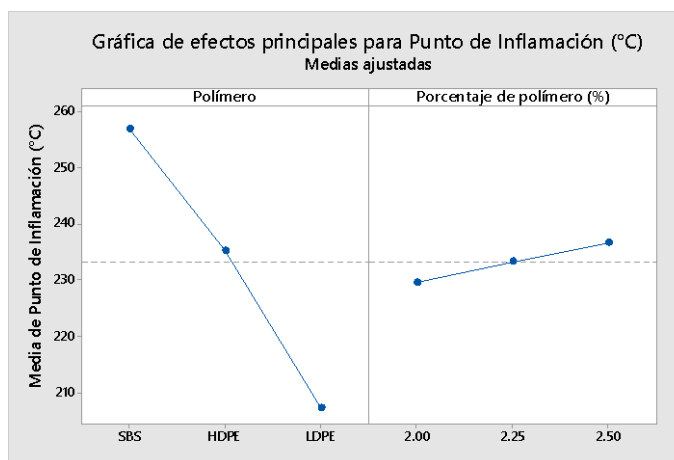
En la figura 26 se muestra la gráfica de efectos para Punto de inflamación. Debido a que las líneas no se encuentran de forma horizontal, existen efectos principales en las

variables de tipo de polímero y porcentaje de polímero. Analizando los resultados, los efectos principales son significativos. Cabe resaltar que el efecto de porcentaje de polímero es poco significativo según los resultados.

Los resultados nos indican que para el Punto de inflamación las mezclas de asfalto modificado con LDPE tiene el valor más bajo con la composición de 2.00% del polímero, sin embargo, a medida que este aumenta su porcentaje de polímero en el asfalto sus valores de punto de inflamación aumentan. Asimismo, se tienen valores intermedios con las mezclas de asfalto modificado con HDPE, este material demostrando que al incrementar su composición en la mezcla tiene un leve aumento en el valor del punto de inflamación. Por último, valores más altos en relación a su composición en mezcla lo tienen las mezclas modificadas con SBS, siendo el valor más alto con la composición de 2.50%.

Figura 26

Gráfico de principales para Punto de inflamación



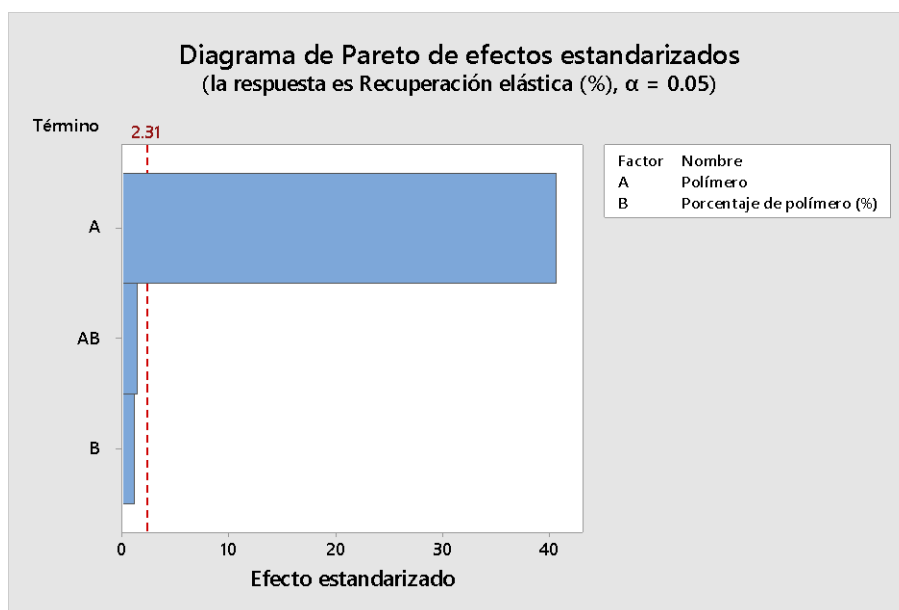
4.5 Recuperación elástica

En la figura 27 se encuentra el diagrama de Pareto para Recuperación elástica. Al analizar esta figura se puede denotar que solo el tipo de polímero tiene significancia

como variable mientras que el porcentaje de polímero no es de gran importancia para una mezcla de asfalto modificado.

Figura 27

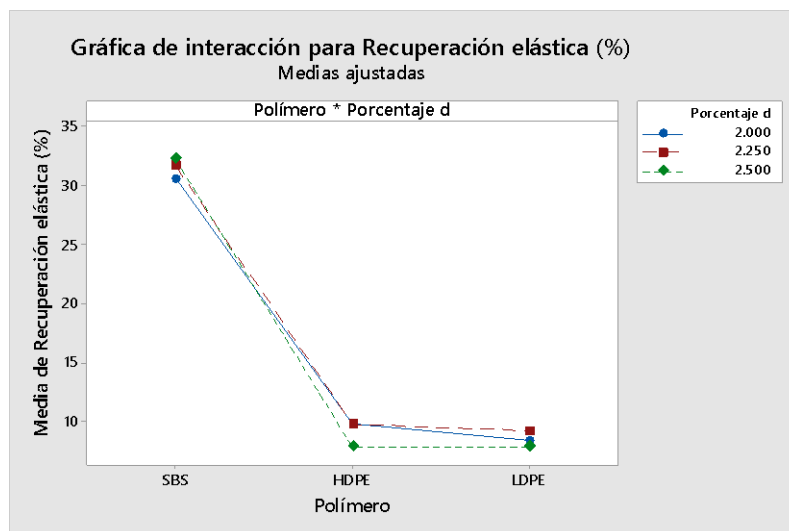
Diagrama de Pareto para Recuperación elástica



En la figura 28 se muestra la gráfica de interacciones para Recuperación elástica en función del tipo de polímero y porcentaje de polímero. Debido a la presencia de líneas paralelas, esto implica que la relación entre el Punto de reblandecimiento y cada factor no depende de la configuración de otro factor. Al analizar los resultados, los efectos de interacción polímero*porcentaje de polímero estos son estadísticamente poco significativos.

Figura 28

Gráfica de interacción para Recuperación elástica

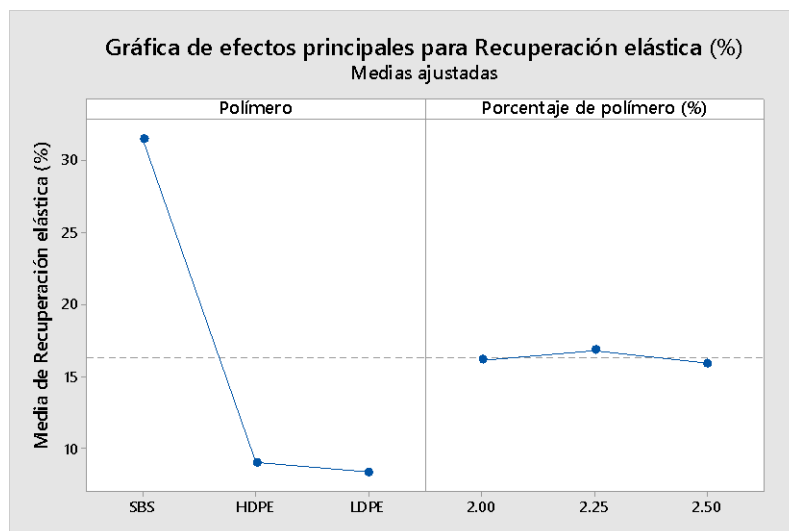


En la figura 29 se muestra la gráfica de efectos para Recuperación elástica. Debido a que existen líneas horizontales, no existen efectos principales en las variables de tipo de polímero y porcentaje de polímero. Analizando los resultados, los efectos principales son poco significativos.

Los resultados nos indican que para la Recuperación elástica el tipo de polímero es la variable de mayor influencia, esto debido a que el SBS es un elastómero y los polietilenos son plastómeros que poco aportan a esta propiedad. Asimismo, el porcentaje de polímero en las mezclas tiene poca significancia en esta propiedad ya que los resultados según el incremento de porcentaje de polímero solo elevan muy poco los valores.

Figura 29

Gráfica de efectos para Recuperación elástica



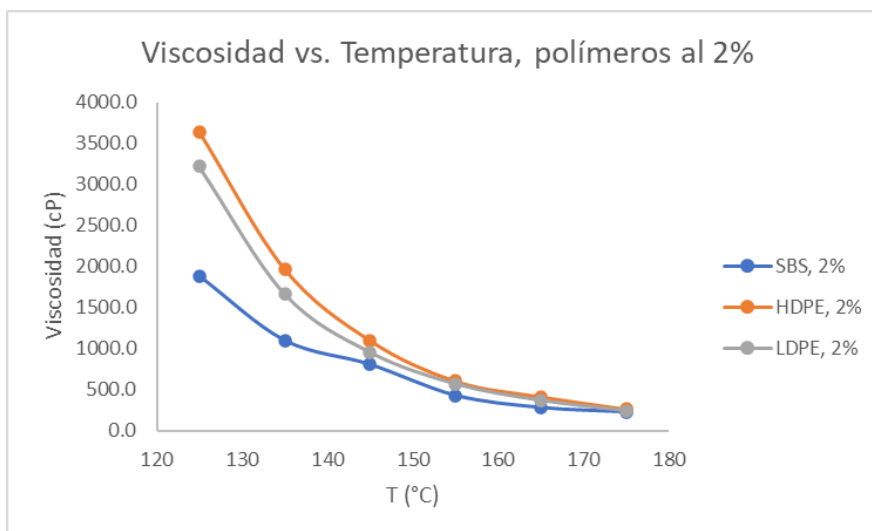
4.6 Viscosidad

En las gráficas 30, 31 y 32 se detallan las viscosidades de las mezclas de asfalto modificado con los polímeros a diferentes temperaturas. Se puede observar que a medida que incrementa la temperatura, la viscosidad de todas las mezclas desciende. Además, las mezclas de asfalto modificado con SBS tienen los valores más bajos de viscosidad, seguido de las mezclas de asfalto modificado con LDPE. Mientras que mezclas de asfalto modificado con HDPE son las que alcanzan valores más altos.

Los resultados nos muestran que tanto el tipo de polímero como el porcentaje de polímero son variables significativas en los valores de viscosidad.

Figura 30

Gráfica de viscosidad vs. temperatura para polímeros al 2%

**Figura 31**

Gráfica de viscosidad vs. temperatura para polímeros al 2.25%

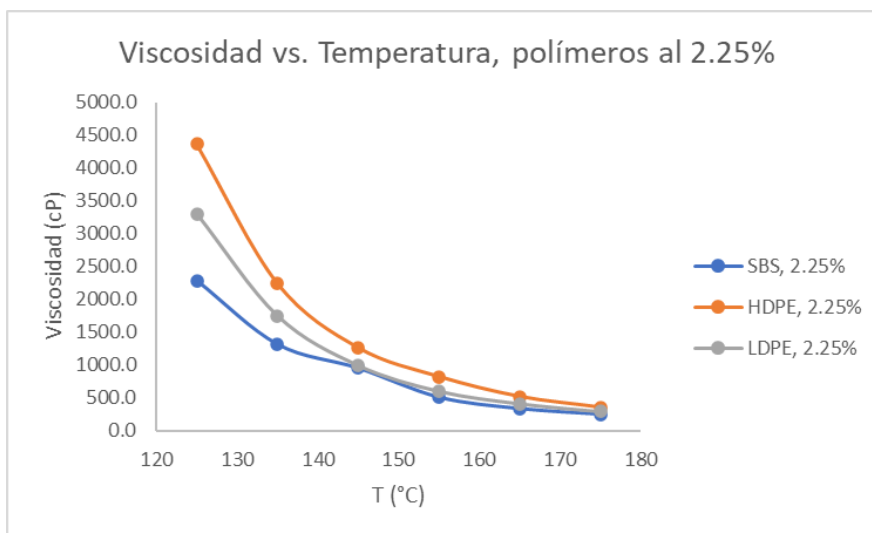
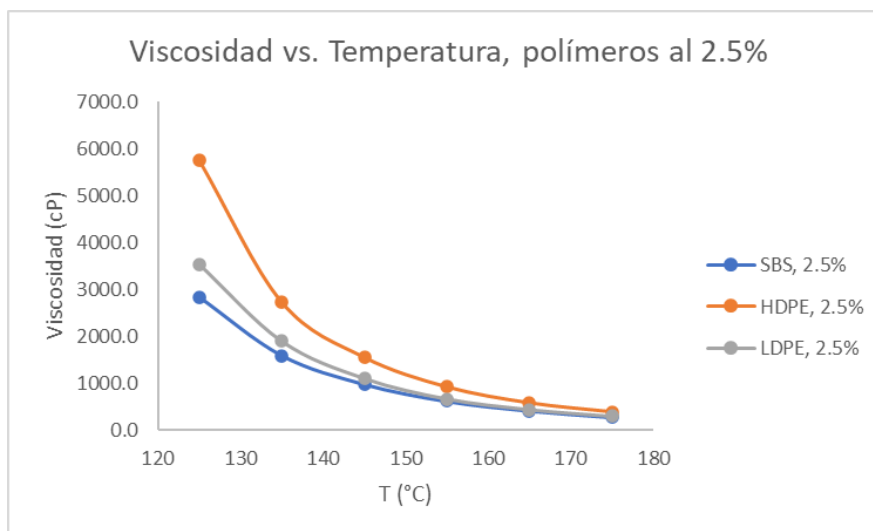


Figura 32

Gráfica de viscosidad vs. temperatura para polímeros al 2.5%



4.7 Requisitos de betunes modificados para material impermeabilizante

Por último, se analiza los requisitos de los betunes modificados para material impermeabilizante según la norma INEN 2137:98.

Tabla 22

Comparativo de norma INEN 2137 con resultados de mezclas con SBS

Requisito	Unidad	TIPO I.C.		SBS		
		Min.	Max.	2%	2.25%	2.5%
Punto de reblandecimiento	°C	110	---	64.3	65.8	66.5
Penetración	dmm	---	25	47	44	41

Nota. Adaptado de INEN. (1998). PRODUCTOS DERIVADOS DEL PETROLEO.

IMPERMEABILIZANTES. MASTICOS BITUMINOSOS MODIFICADOS. REQUISITOS.

En Normativa Ecuatoriana de Materiales Bituminosos y Bituminosos Modificados. INEN.

Tabla 23

Comparativo de norma INEN 2137 con resultados de mezclas con LDPE

Requisito	Unidad	TIPO I.C.		LDPE		
		Min.	Max.	2%	2.25%	2.5%
Punto de reblandecimiento	°C	110	---	59	64.1	67.8
Penetración a 25°C, 100g, 5s	dmm	---	25	55	45	41

Nota. Adaptado de INEN. (1998). PRODUCTOS DERIVADOS DEL PETROLEO.

IMPERMEABILIZANTES. MASTICOS BITUMINOSOS MODIFICADOS. REQUISITOS.

En Normativa Ecuatoriana de Materiales Bituminosos y Bituminosos Modificados. INEN.

Tabla 24

Comparativo de norma INEN 2137 con resultados de mezclas con HDPE

Requisito	Unidad	TIPO I.C.		HDPE		
		Min.	Max.	2%	2.25%	2.5%
Punto de reblandecimiento	°C	110	---	75.2	77.4	94.3
Penetración a 25°C, 100g, 5s	dmm	---	25	43	40	36

Nota: Adaptado de INEN. (1998). PRODUCTOS DERIVADOS DEL PETROLEO.

IMPERMEABILIZANTES. MASTICOS BITUMINOSOS MODIFICADOS. REQUISITOS.

En Normativa Ecuatoriana de Materiales Bituminosos y Bituminosos Modificados. INEN.

Para las Tablas 22, 23 y 24 los resultados nos muestran que ninguna de las mezclas de asfalto modificados con estos polímeros como SBS, HDPE y LDPE cumplen con los requisitos de la norma INEN 2137. Sin embargo, para que estas mezclas alcancen estos valores de la norma INEN se suele adicionar rellenos, modificadores y minerales que mejoran las propiedades mecánicas y fisicoquímicas de las mezclas de asfalto modificado.

Capítulo V

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

Se determinó las propiedades fisicoquímicas del asfalto usado como materia prima en esta investigación. Los resultados se encuentran dentro del rango especificado por la norma INEN para su clasificación como asfalto AC-20.

Las condiciones de operación óptimas se determinaron satisfactoriamente mediante las pruebas de homogeneidad y dispersión. En el caso de las mezclas de asfalto modificado con SBS se estableció el rango de temperatura de 195 – 205°C, agitación de 1000 rpm, tiempo de mezclado de 2 horas. En el caso de las mezclas de asfalto modificado con HDPE y LDPE se estableció el rango de temperatura de 165 – 175°C, agitación de 1000 rpm, tiempo de mezclado de 1.5 horas.

El tiempo de mezclado de 2 horas se descartó para el caso de las mezclas de bitumen modificado con polietilenos debido a la poca diferencia en la dispersión de moléculas de polímero al comparar los resultados con el tiempo de mezclado de 1.5 horas.

En base a normas ASTM, UNE e INEN se han determinado las propiedades fisicoquímicas de las mezclas de asfalto modificado con polímeros. Para el punto de reblandecimiento, penetración, punto de inflamación y viscosidad el efecto e interacción de las variables son significativas estadísticamente. Mientras que, para la densidad y recuperación elástica solo el tipo de polímero tiene significancia estadística.

El punto de reblandecimiento, el punto de inflamación y la viscosidad es directamente proporcional al porcentaje de polímero usado en la mezcla de asfalto

modificado. Mientras que, la penetración es inversamente proporcional al porcentaje de polímero usado en la mezcla de asfalto modificado.

La comparación entre mezclas de asfalto modificado con SBS y mezclas de asfalto modificado con polietilenos han tenido resultados muy variables en algunas propiedades fisicoquímicas. Además, la propiedad que más diferencia tienen entre ambas mezclas es la elasticidad de las mezclas modificadas con SBS versus la poca penetración y gran viscosidad de las mezclas modificados con polietilenos.

Tanto la adición del SBS como del HDPE y del LDPE mejoran las propiedades fisicoquímicas de punto de reblandecimiento, penetración, y viscosidades iniciales del bitumen proveniente de la Refinería de Esmeraldas.

Las propiedades fisicoquímicas iniciales del bitumen proveniente de la Refinería de Esmeraldas que no tienen gran cambio con la adición de polímeros modificantes son la densidad, y la recuperación elástica en el caso de los polietilenos.

5.2 Recomendaciones

Realizar diseños experimentales más rigurosos para una mejor obtención de datos junto con la adición de más condiciones de operaciones y variables.

Usar contenedores más grandes para la preparación de las mezclas de asfalto modificados con polímeros con el fin de aprovechar el mezclador y su relación con el agitador a nivel planta.

Añadir pruebas de desempeño mecánico como ruptura por tensión, comportamiento a la cizalla, prueba de adhesividad, etc. Esto mediante la preparación de láminas de las mezclas de asfalto modificado aumentando la base de la mezcla a 1000 gramos.

Bibliografía

- ASTM. (2015). Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer D4402/D4402M-15. En *ASTM Volume 04.03 Road and Paving Materials; Vehicle-Pavement Systems*.
- ASTM. (2018a). Standard Specification for Viscosity-Graded Asphalt Binder for Use in Pavement Construction D3381/D3381M – 18. En *ASTM Volume 04.03 Road and Paving Materials; Vehicle-Pavement Systems*.
- ASTM. (2018b). Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester D92-18. En *ASTM Volume 04.03 Road and Paving Materials; Vehicle-Pavement Systems*.
- ASTM. (2020a). Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials D5/D5M-20. En *ASTM Volume 04.03 Road and Paving Materials; Vehicle-Pavement Systems*.
- ASTM. (2020b). Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus) D36/D36M-14. En *ASTM Volume 04.03 Road and Paving Materials; Vehicle-Pavement Systems*.
- Cedeño, F., & Espín, P. (2014). *Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente Modificadas con Tetra Pak, Alambre de Neumáticos Fuera de Uso y Limadura Metálica Reciclados con Ligante Asfáltico AC-20*. Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.
- Córdoba, C., Mera, J., Martínez, D., & Rodríguez, J. (2010). Aprovechamiento de polipropileno y polietileno de alta densidad reciclados, reforzados con fibra vegetal, Tetera (Stromanthe Stromathoides). *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 11(7), 417-427.

- Cubberley, R. H., Hill, L. P., & Mohr, W. J. (1951). *Asphalt-base laminating adhesive*.
Google Patents.
- Ebewele, R. O. (2000). *Polymer science and technology*. CRC press.
- Estrada, V. (2017). *Estudio y análisis de desempeño de mezcla asfáltica convencional PEN 85/100 plus y mezcla asfáltica modificada con polímero tipo SBS PG 70-28*.
Universidad Andina del Cusco.
- García-Morales, M., Partal, P., Navarro, F. J., Martínez-Boza, F., Gallegos, C.,
González, N., González, O., & Muñoz, M. E. (2004). Viscous properties and
microstructure of recycled eva modified bitumen. *Fuel*, 83(1), 31-38.
- Habib, N. (2013). *MORPHOLOGY AND RHEOLOGY OF PP AND LLDPE MODIFIED
BITUMENS AND THEIR EFFECT ON ASPHALT MIX PROPERTIES*. [Tesis
doctoral: Universiti Teknologi PETRONAS].
- Humberto, G. P., & De La Vara, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. Editorial
Mc Graw Hill.
- Humboldt. (2022). *Cleveland Flash and Fire Point Tester*.
<https://www.humboldtmg.com/cleveland-open-cup-flash-tester-electric.html>
- Hunter, R. N., Self, A., Read, J., & Hobson, E. (2015). *The shell bitumen handbook*. ICE
Publishing London, UK:
- INEN. (1998). PRODUCTOS DERIVADOS DEL PETROLEO. IMPERMEABILIZANTES.
MASTICOS BITUMINOSOS MODIFICADOS. REQUISITOS. En *Normativa
Ecuatoriana de Materiales Bituminosos y Bituminosos Modificados*. INEN.
- INEN. (2010). PRODUCTOS DERIVADOS DEL PETRÓLEO. CEMENTO ASFÁLTICO
(CLASIFICACIÓN POR VISCOSIDAD). REQUISITOS. NTE INEN 2 155:2010. En

Normativa Ecuatoriana de Materiales Bituminosos y Bituminosos Modificados.

IRAM. (2011). Determinación de la recuperación elástica por torsión IRAM 6830. En *Normas Argentinas para Materiales Bituminosos.*

Isacsson, U., & Lu, X. (1995). Testing and appraisal of polymer modified road bitumens—state of the art. *Materials and Structures*, 28(3), 139-159.

Joohari, I. B., & Giustozzi, F. (2020). Chemical and high-temperature rheological properties of recycled plastics-polymer modified hybrid bitumen. *Journal of Cleaner Production*, 276, 123064.

Kindt, L. J., Gaidis, J. M., & Kellett, J. S. (1991). *Primerless waterproofing laminates.* Google Patents.

Lesueur, D. (2009). The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in colloid and interface science*, 145(1-2), 42-82.

Lizcano, F. A. R. (2007). Mezclas asfálticas modificadas con un elastómero (caucho) y un plastómero (tiras de bolsas de leche con asfalto 80-100). *Infraestructura vial*, 9(17), 25-34.

Luo, W., & Chen, J. (2011). Preparation and properties of bitumen modified by EVA graft copolymer. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1830-1835.

Maila, M. (2013). *COMPORTAMIENTO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON POLÍMERO ETILENO VINIL ACETATO (EVA).* UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR.

Masson, J. F., & Polomark, G. M. (2001). Bitumen microstructure by modulated differential scanning calorimetry. *Thermochimica acta*, 374(2), 105-114.

Minitab. (2022a). *Diagrama de Pareto de efectos estandarizados*.

<https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/help-and-how-to/statistical-modeling/regression/how-to/fit-regression-model/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/pareto-chart/>

Minitab. (2022b). *Ejemplo de Gráficas factoriales con un diseño factorial*.

<https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/help-and-how-to/statistical-modeling/using-fitted-models/how-to/factorial-plots/before-you-start/example-with-a-factorial-design/>

Newman, J. K. (1998). Dynamic shear rheological properties of polymer-modified asphalt binders. *Journal of Elastomers & Plastics*, 30(3), 245-263.

Pérez-Lepe, A., Martínez-Boza, F. J., Gallegos, C., González, O., Muñoz, M. E., & Santamaria, A. (2003). Influence of the processing conditions on the rheological behaviour of polymer-modified bitumen☆. *Fuel*, 82(11), 1339-1348.

PINZUAR. (2022). *DISPOSITIVO DE TORSIÓN PARA ASFALTOS*.

<https://www.pinzuar.com.co/pinzuar/es/productos/asfaltos/analisis-de-mezclas-asfalticas/dispositivo-torsion-asfaltos/>

Polacco, G., Stastna, J., Biondi, D., Antonelli, F., Vlachovicova, Z., & Zanzotto, L. (2004). Rheology of asphalts modified with glycidylmethacrylate functionalized polymers. *Journal of Colloid and Interface science*, 280(2), 366-373.

PyS. (2022). *PENETRÓMETRO UNIVERSAL MANUAL*.

<https://pys.pe/producto/penetrometro-universal-manual/>

Read, J., & Whiteoak, D. (2003). *The shell bitumen handbook*. Thomas Telford.

Revelo, M. (2014). *Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente Modificadas con*

Elastómero (Caucho) y Tereftalato de Polietileno Reciclados con Ligante Asfáltico AC-20. Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

Roberts, F. L., Mohammad, L. N., & Wang, L. B. (2002). History of hot mix asphalt mixture design in the United States. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(4), 279-293.

Sengoz, B., & Isikyakar, G. (2008). Analysis of styrene-butadiene-styrene polymer modified bitumen using fluorescent microscopy and conventional test methods. *Journal of hazardous materials*, 150(2), 424-432.

Synyuk, O., Musiał, J., Zlotenko, B., & Kulik, T. (2020). Development of Equipment for Injection Molding of Polymer Products Filled with Recycled Polymer Waste. *Polymers*, 12(11), 2725.

Zhang, J., Yao, Z., Yu, T., Liu, S., & Jiang, H. (2019). Experimental evaluation of crumb rubber and polyethylene integrated modified asphalt mixture upon related properties. *Road Materials and Pavement Design*, 20(6), 1413-1428.

Zickell, T., & Karlis, J. (2010). *Weatherproof underlayment with high filler content polymer asphalt layer.* Google Patents.

Anexos