



ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS
CON POLÍMEROS Y ADITIVO DE ADHERENCIA, DISTRITO DE MÁNCORA -
PERÚ

Línea de investigación:
Seguridad vial e infraestructura de transporte

Tesis para optar el grado académico de Doctor en Ingeniería Civil

Autor

Ramírez Montenegro, Marco Antonio

Asesor

Soto Vásquez, Duber Enrique

ORCID: 0000-0002-4505-2053

Jurado

Defilippi Shinzato, Teresa Milagros

Polo Romero, Libertad María Socorro

Aguirre Enciso, Josué Alonso

Lima - Perú

2025

PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON POLÍMEROS Y ADITIVO DE ADHERENCIA, DISTRITO DE MÁNCORA - PERÚ

INFORME DE ORIGINALIDAD

22%

INDICE DE SIMILITUD

21%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

8%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

hdl.handle.net

Fuente de Internet

9%

2

repositorio.urp.edu.pe

Fuente de Internet

1%

3

repositorio.ucv.edu.pe

Fuente de Internet

1%

4

www.mtc.gob.pe

Fuente de Internet

<1%

5

Submitted to Universidad Ricardo Palma

Trabajo del estudiante

<1%

6

Submitted to Universidad Andina del Cusco

Trabajo del estudiante

<1%

7

Submitted to Universidad San Ignacio de Loyola

Trabajo del estudiante

<1%

8

docplayer.es

Fuente de Internet

<1%

9

repositorio.upn.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

10

repositorio.unfv.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

11

es.slideshare.net

Fuente de Internet

<1%



Universidad Nacional
Federico Villarreal

VRIN | VICERRECTORADO
DE INVESTIGACIÓN

ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON POLÍMEROS Y ADITIVO
DE ADHERENCIA, DISTRITO DE MÁNCORA - PERÚ

Línea de investigación
Seguridad vial e infraestructura de transporte

Tesis para optar el grado académico de
Doctor en Ingeniería Civil

Autor
Ramírez Montenegro, Marco Antonio

Asesor
Soto Vásquez, Duber Enrique
ORCID: 0000-0002-4505-2053

Jurado
Defilippi Shinzato, Teresa Milagros
Polo Romero, Libertad María Socorro
Aguirre Enciso, Josué Alonso

Lima – Perú
2025

DEDICATORIA

En primer Lugar, a Dios por mostrarme día a día que, con humildad, paciencia y sabiduría, todo es posible y para aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio, para poder lograr mis objetivos, ya que sin él no hubiera podido.

AGRADECIMIENTO

A mis padres: **MARCO ANTONIO RAMÍREZ GÁLVEZ** y
LUZ EDELINDA MONTENEGRO DE RAMIREZ, a mi
hermana **PATRICIA PAOLA RAMIREZ**
MONTENEGRO, quienes con su ejemplo, amor, apoyo y
comprensión incondicional estuvieron siempre a lo largo de
formación como persona y profesional, y de manera muy
especial, a mi novia, **LUCIA TRELLES CÓRDOVA**, por su
paciencia, amor y apoyo inquebrantable. Gracias por caminar a
mi lado con fe en mis capacidades, por escucharme en los
momentos difíciles, y por ser luz en mis días de incertidumbre.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	x
ABSTRACT.....	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Descripción del problema	2
1.3 Formulación del problema	3
1.3.1 Problema general.....	3
1.3.2 Problemas específicos.....	4
1.4 Antecedentes.....	4
1.4.1 Antecedentes nacionales	4
1.4.2 Antecedentes internacionales.....	8
1.5 Justificación de la investigación	13
1.5.1 Justificación teórica.....	13
1.5.2 Justificación de relevancia social.....	14
1.5.3 Justificación prácticas	14
1.5.4 Justificación metodológica.	14
1.5.5 Justificación de valor teórico.....	15
1.6 Limitaciones de la Investigación	15
1.6.1 Geográfica	15
1.6.2 Temporal.....	15
1.6.3 Temática.....	15
1.6.4 Muestral	16
1.7 Objetivos.....	16
1.7.1 Objetivo general.....	16
1.7.2 Objetivos específicos.....	16

1.8 Hipótesis	17
1.8.1 <i>Hipótesis general</i>	17
1.8.2 <i>Hipótesis específica</i>	17
II. MARCO TEÓRICO	18
2.1 Marco conceptual.....	18
2.1.1 <i>Cemento Asfáltico</i>	18
2.1.2 <i>Cemento Asfáltico Modificado con Polímeros SBS</i>	20
2.1.3 <i>Grado de Desempeño (PG) del Asfalto</i>	21
2.1.4 <i>Agregados de la Mezcla Asfáltica</i>	23
2.1.5 <i>Polímeros Elastoméricos (SBS)</i>	25
2.1.6 <i>Aditivo de Adherencia (Quimibond 3000)</i>	27
2.2 Marco filosófico.....	28
2.2.1 <i>Determinación del Grado de Desempeño</i>	28
2.2.2 <i>Estudio de condiciones climáticas del Distrito de Máncora</i>	31
2.2.3 <i>American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)</i>	33
2.2.4 <i>Manual de Ensayos de Materiales – MTC</i>	33
2.2.5 <i>Manual de Carreteras Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (EG-2013)</i>	34
2.2.6 <i>Pavimento de Mezcla Asfáltica en Caliente</i>	34
2.2.7 <i>Método Marshall</i>	43
2.2.8 <i>Método de Diseño Superpave</i>	44
2.2.9 <i>Ensayo de Resistencia al Ahuellamiento (Rueda de Hamburgo)</i>	45
2.2.10 <i>Ensayo de Resistencia a la Flexión Elástica (Modulo Resiliente)</i>	46
2.2.11 <i>Ensayo de Resistencia a la Elasticidad (Modulo Dinámico)</i>	47
2.2.12 <i>Ensayo de Resistencia a la Fatiga (Viga Cuatro Puntos)</i>	48
III. MÉTODO	50
3.1 Tipo de investigación.....	50

3.2 Población y muestral.....	50
3.2.1 Población	50
3.2.2 Muestra	51
3.3 Operacionalización de variables	54
3.4 Instrumentos y técnicas.....	55
3.4.1 Instrumentos.....	55
3.4.2 Técnicas	55
3.5 Procedimientos.....	56
3.6 Análisis de datos	57
IV. RESULTADOS	59
4.1 Materiales para la Mezcla Asfáltica Modificada.	59
4.1.1 Agregado Grueso	60
4.1.2 Agregado Fino	63
4.1.3 Combinación de Agregados	65
4.1.4 Diseño de Grado de Desempeño del Asfalto (PG 76 - 10)	67
4.2 Diseño Marshal de Mezcla Asfáltica (ASTM D 3515 T5).	72
4.3 Ensayo a la Resistencia a la Humedad TSR (AASHTO T 283).	77
4.4 Ensayo de Rueda de Hamburgo (AASHTO T 324).	79
4.5 Ensayo del Módulo Resiliente (AASHTO TP 31).	81
4.6 Ensayo del Módulo Dinámico (AASHTO T 342).	84
4.7 Ensayo de Fatiga 04 Puntos (AASHTO T 321).	88
4.8 Contrastación de Hipótesis.	90
4.8.1 Hipótesis 01.....	90
4.8.2 Hipótesis 02.....	93
4.8.3 Hipótesis 03.....	99
4.8.4 Hipótesis 04.....	101
V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	104

VI. CONCLUSIONES	116
VII. RECOMENDACIONES.....	119
VIII.REFERENCIAS.....	121
IX. ANEXOS	128

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Estación meteorológica utilizada para el cálculo del PG</i>	<i>31</i>
Tabla 2	<i>Requisitos para el agregado</i>	<i>35</i>
Tabla 3	<i>Requisitos para el agregado fino</i>	<i>36</i>
Tabla 4	<i>Requisitos para usos granulométricos en MAC.....</i>	<i>37</i>
Tabla 5	<i>Requisitos para gradación de mezclas.....</i>	<i>37</i>
Tabla 6	<i>Efectividad de los aditivos adherentes</i>	<i>38</i>
Tabla 7	<i>Especificaciones de cemento asfáltico modificado con polímeros Tipo I</i>	<i>39</i>
Tabla 8	<i>Especificaciones de cemento asfáltico modificado con polímeros Tipo II</i>	<i>39</i>
Tabla 9	<i>Especificaciones de cemento asfáltico modificado con polímeros Tipo IV</i>	<i>40</i>
Tabla 10	<i>Requisitos para mezclas de concreto bituminoso</i>	<i>41</i>
Tabla 11	<i>Vacíos mínimos en el agregado mineral (VMA)</i>	<i>41</i>
Tabla 12	<i>Requerimiento para Adherencia</i>	<i>42</i>
Tabla 13	<i>Vacíos mínimos en el agregado mineral</i>	<i>42</i>
Tabla 14	<i>Numero de muestras para determinar el contenido óptimo de asfalto y polímeros elastoméricos para el ensayo Marshall – MTE E 504.....</i>	<i>52</i>
Tabla 15	<i>Numero de muestras para el ensayo de Rueda de Hamburgo de la mezcla asfáltica modificado con polímeros elastoméricos y aditivo adherente – AASHTO T 324.....</i>	<i>52</i>
Tabla 16	<i>Numero de muestras para el ensayo de Modulo Resiliente de la mezcla asfáltica modificado con polímeros elastoméricos y aditivo adherente – AASHTO TP 31</i>	<i>52</i>
Tabla 17	<i>Numero de muestras para el ensayo de Modulo Dinámico de la mezcla asfáltica modificado con polímeros elastoméricos y aditivo adherente – AASHTO T 342.....</i>	<i>53</i>
Tabla 18	<i>Numero de muestras para el ensayo a la resistencia a la fatiga de la mezcla asfáltica modificado con polímeros elastoméricos y aditivo adherente – AASHTO T 321</i>	<i>53</i>
Tabla 19	<i>Operacionalización de variables</i>	<i>54</i>
Tabla 20	<i>Ubicación y acceso desde la Ruta PE-IN a la Cantera Fernández</i>	<i>59</i>
Tabla 21	<i>Gradación del Agregado Grueso TM - 3/4”</i>	<i>61</i>
Tabla 22	<i>Gradación del Agregado Grueso TM - 1/2”</i>	<i>62</i>

Tabla 23	<i>Verificación de las características físicas del agregado grueso</i>	63
Tabla 24	<i>Gradación de Arena Chancada TM - <3/8.....</i>	63
Tabla 25	<i>Gradación de Arena Zarandeada TM - <3/8”</i>	64
Tabla 26	<i>Porcentaje de los Agregados para el diseño de uso MAC-2</i>	66
Tabla 27	<i>Granulometría de combinación Teórica de Agregados.....</i>	66
Tabla 28	<i>Resultados de ensayos de evaluación de las propiedades del asfalto Modificado PG 76-10 (BITUASFALTO PG76-10)</i>	70
Tabla 29	<i>Resultados de ensayos del asfalto Modificado PG 76-10 (BITUASFALTO PG76-10)</i>	71
Tabla 30	<i>Resultado de diseño Marshall de la mezcla asfáltica con ligante asfáltico PG76-10 modificado con polímero y un aditivo de adherencia.</i>	73
Tabla 31	<i>Resultado de diseño Marshall de la mezcla asfáltica con ligante asfáltico PG76-10 modificado con polímero y un aditivo de adherencia.</i>	74
Tabla 32	<i>Resumen del resultado del diseño Marshall optimo con ligante asfáltico PG76-10 modificado con un 3% de polímero SBS y aditivo de adherencia.</i>	75
Tabla 33	<i>Daño por humedad de la mezcla asfáltica modificada con con polímeros SBS y aditivo de adherencia.</i>	78
Tabla 34	<i>Resultados del ensayo de Rueda de Hamburgo.</i>	79
Tabla 35	<i>Resultados del módulo resiliente de la mezcla asfáltica elaborada con ligante PG76-10 modificado con polímero SBS y aditivo de adherencia, evaluada a una temperatura de 20 °C</i>	81
Tabla 36	<i>Resultados del módulo resiliente de la mezcla asfáltica elaborada con ligante PG76-10 modificado con polímero SBS y aditivo de adherencia, evaluada a una temperatura de 40 °C.</i>	83
Tabla 37	<i>Resultados de la Briqueta N°01 del módulo dinámico de la mezcla asfáltica modificada.....</i>	84
Tabla 38	<i>Resultados de la Briqueta N°02 del módulo dinámico de la mezcla asfáltica modificada.....</i>	85
Tabla 39	<i>Resultados del módulo dinámico para la mezcla con polímeros SBS y aditivo de adherencia</i>	86

Tabla 40	<i>Datos Estadísticos de Resistencia al Ahuellamiento</i>	90
Tabla 41	<i>Datos de Contratación de Resistencia a la Fatiga</i>	101
Tabla 42	<i>Datos de Estadísticos de Resistencia a la Fatiga</i>	102
Tabla 43	<i>Resumen del resultado de daño por humedad de la mezcla asfáltica modificada con polímeros SBS y aditivo de adherencia.....</i>	109
Tabla 44	<i>Resultados del ensayo de rueda cargada de Hamburgo.....</i>	109
Tabla 45	<i>Resumen de resultados del ensayo de módulo resiliente (elasticidad)</i>	110
Tabla 46	<i>Resumen del ensayo de fatiga en vigas de cuatro puntos para la mezcla asfáltica bajo diferentes niveles de microdeformación</i>	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	<i>Fuentes Principales de obtención de cementos asfálticos</i>	18
Figura 2	<i>Proceso de refinación del petróleo y obtención de cemento asfáltico</i>	19
Figura 3	<i>Propiedades generales del cemento asfáltico</i>	20
Figura 4	<i>Etapas en la vida del ligante asfáltico</i>	23
Figura 5	<i>Estructura química lineal de un polímero SBS</i>	27
Figura 6	<i>Ubicación de estación meteorológica, Tumbes</i>	32
Figura 7	<i>Temperaturas en la estación meteorológica, Tumbes</i>	32
Figura 8	<i>Equipo de ensayo a fatiga a flexión en 04 puntos</i>	48
Figura 9	<i>Principios básicos del ensayo a flexión en viga de cuatro puntos</i>	49
Figura 10	<i>Acceso a la cantera Fernández desde la Ruta PE-IN</i>	59
Figura 11	<i>Ubicación y Área aproximada de la cantera Fernández</i>	60
Figura 12	<i>Gráfico de Gradación del Agregado Grueso TM - 3/4"</i>	61
Figura 13	<i>Gráfico de Gradación del Agregado Grueso TM - 3/4"</i>	62
Figura 14	<i>Gráfico de Gradación de Arena Chancada TM - <3/8"</i>	64
Figura 15	<i>Gráfico de Gradación de Arena Chancada TM - <3/8"</i>	65
Figura 16	<i>Gráfico de Granulometría de combinación Teórica de Agregados</i>	67
Figura 17	<i>Gráfico de Datos Hidrometereológicos en la estación EL ALTO - SENAMI</i>	69
Figura 18	<i>Gráfico de curva de Viscosidad (cP) vs. Temperatura (°C)</i>	72
Figura 19	<i>Curvas de relación entre los parámetros de diseño Marshall y el contenido de ligante asfáltico PG76-10 modificado con polímero y aditivo.</i>	76
Figura 20	<i>Compactación de especímenes Marshall.</i>	77
Figura 21	<i>Compactación de especímenes Marshal parte 02.</i>	77
Figura 22	<i>Curvas de resultados del ensayo de resistencia al ahuellamiento permanente usando asfalto PG76-10 modificado con polímero SBS y aditivo de adherencia.</i>	80
Figura 23	<i>Compactación de especímenes con un compactador giratorio para el ensayo de rueda de Hamburgo.</i>	80

Figura 24	<i>Ensayo en la máquina de rueda de Hamburgo.</i>	81
Figura 25	<i>Correlación entre el módulo dinámico y la frecuencia de carga.</i>	87
Figura 26	<i>Especímenes sumergidos en agua para el ensayo de módulo dinámico.</i>	87
Figura 27	<i>Especímenes para procedimiento del ensayo de módulo dinámico.</i>	88
Figura 28	<i>Espécimen del Ensayo de Viga de Fatiga.</i>	89
Figura 29	<i>Espécimen Procedimiento de ensayo de Viga de Fatiga.</i>	89
Figura 30	<i>Espécimen Procedimiento Estadístico del ensayo de Viga de Fatiga.</i>	99
Figura 31	<i>Parámetros de curva maestra de Modulo dinámico (E^*) vs Frecuencia Reducida (Hz)</i>	112
Figura 32	<i>Construcción de la Curva Maestra General</i>	112
Figura 33	<i>Parámetros de curva maestra de Modulo dinámico (E^*) vs Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)</i>	113
Figura 34	<i>Parámetros del modelo de fatiga $\varepsilon=A \cdot N_f^{-B}$ y valor de ε_0 para la mezcla evaluada.</i>	115

RESUMEN

La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo y surge debido a la falta de implementar propuestas tecnológicas en el Perú, por ello el desafío de ensayos innovadores para mejorar las propiedades físico-mecánicas de mezclas asfálticas, como resistencia a la flexión elástica, a la fatiga y reducción de deformación; incorporando polímeros SBS y aditivo de adherencia. Con el propósito de determinar el nivel adecuado de aglutinante asfáltico PG76-10 en la combinación asfáltica alterada con el fin de prolongar su durabilidad, a través de ensayos en el laboratorio. El método de investigación fue deductivo con orientación aplicada y enfoque cuantitativo; el tipo de investigación fue descriptiva, correlacional y explicativa; diseño experimental, longitudinal y prospectivo. Esta investigación determino el contenido óptimo, en función del ensayo Marshall se obtuvo una estabilidad de 1977Kg, para la deformación permanente alcanzaron valores de 4,45 mm, en cuanto al ensayo de TSR se obtuvo un valor de 84.9%, con relación del módulo dinámico a la resistencia a la elasticidad se obtuvo valores de 5864 Mpa a 21.1°C y con una frecuencia de 10 Hz, así mismo para el ensayo de resistencia a la fatiga se obtuvo los resultados de 434×10^6 microdeformaciones a 2.32×10^6 ciclos. En conclusión, un cemento asfáltico modificado PG76-10 con porcentajes óptimos de 5.7%, con porcentaje de polímeros SBS al 3.0% y un aditivo de adherencia con porcentajes de 0.5%, está cumpliendo los parámetros técnicos mínimos de una mezcla asfáltica en caliente que satisfaga los ensayos de Ahuellamiento, Resistencia a la Elasticidad y Fatiga.

Palabras Clave: Mezcla asfáltica modificada, polímeros SBS, Aditivo de Adherencia, propiedades físico-mecánicas, ensayo a la resistencia a la Elasticidad y Fatiga, deformación y ahuellamiento.

ABSTRACT

The present research adopts a quantitative approach and arises due to the lack of implementing technological proposals in Peru, for them the challenge of a technological proposal of innovative tests to improve the physical-mechanical properties of asphalt mixture, such as resistance to elastic bending, fatigue and deformation reduction; incorporating SBS polymers and adhesion additive. With the objective of establishing the optimum percentage of SBS polymers and adhesion additive in the modified asphalt mix to enhance its physical-mechanical characteristics, through laboratory tests. The research method was deductive with applied orientation and quantitative approach; the type of research was descriptive, correlational and explanatory; experimental, longitudinal and prospective design. The present research determined the optimum content of PG76-10 asphalt of 5.70%, with 3.0% of SBS polymers and 0.5% of adhesion additive, according to the Marshall test a stability of 1977Kg was obtained, for the permanent deformation values of 4.45 mm were reached, for the TSR test a value of 84.9% was obtained, in relation to the dynamic module to the resistance to elasticity values 5864 Mpa a 21.1°C were obtained, likewise for the fatigue resistance test, the results were 434ε6 microdeformations at 2.32×10^6 cycles. In conclusion, a modified asphalt cement PG76-10 with optimum percentages of 5.7%, with a percentage of SBS polymers at 3.0% and an adhesion additive with percentages of 0.5%, fulfilling the minimum technical parameters of a hot asphalt mix that satisfies the rutting, resistance to elasticity and fatigue tests.

Key Words: Modified asphalt mix, SBS polymers, Adhesion Additive, physical-mechanical properties, deformation, rutting, elasticity and fatigue resistance test.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

A nivel mundial, los sistemas de pavimentación flexible en carreteras., se observa un aumento en el tráfico y las cargas vehiculares, junto con variaciones en las velocidades de circulación. Además, factores climáticos como el sol, la lluvia, la nieve, los vientos y los cambios térmicos influyen significativamente en el desempeño del pavimento asfáltico y en mezclas asfálticas. Estas circunstancias requieren la aplicación de polímeros para modificar y perfeccionar las propiedades de los pavimentos, optimizando así su desempeño. (IPC Global, 2018).

En determinadas naciones, los progresos en la tecnología han facilitado el desarrollo de polímeros que simplifican el proceso de producción. En este escenario, se necesita únicamente una Planta de Producción de Mezcla Asfáltica, en la cual se combinan el asfalto, los agregados y el polímero sin la necesidad de incrementar la temperatura de este. Este procedimiento incrementa la productividad, disminuye los costos y acorta el tiempo de ejecución, manteniendo la calidad del producto final. Se denomina a esta tecnología como Mezclas Asfálticas Modificadas.

No obstante, en Perú, la fabricación de pavimentos con las propiedades señaladas continúa siendo llevada a cabo de forma tradicional mediante la utilización de mezclas con asfalto modificado. Este procedimiento implica la utilización de dos instalaciones diferenciadas: una Planta de Asfalto Modificado, en la que se amalgama el asfalto con polímeros y modificadores, y una Planta de Producción de Mezcla Asfáltica, en la que se amalgaman los agregados con el asfalto previamente modificado. Esta metodología conlleva un incremento en los gastos operacionales y un periodo de implementación más extenso.

1.2 Descripción del problema

Las vías pavimentadas nacionales se han realizado utilizando mezclas asfálticas en procesos en caliente, tibio o frío y de manera convencional, pero no cumplieron con los objetivos para los que fueron diseñadas. Por ello, las mezclas asfálticas convencionales se modifican para mejorar o aumentar sus propiedades físico-mecánicas, de manera que puedan soportar el tránsito de vehículos pesados en vías de alto tráfico. Se recurren a materiales sintéticos, Al igual que los polímeros, que contribuyen a mejorar las características reológicas del betún.

El Perú tiene tres regiones geográficas claramente delimitadas: Costa, Sierra y Selva. En estas zonas, se encuentran áreas con actividades económicas significativas, siendo la región de Lima la más destacada por la concentración de la actividad comercial nacional. La conexión hacia esta región se realiza mediante carreteras asfaltadas en caliente, las cuales soportan altos volúmenes de tráfico pesado. Esto eleva la susceptibilidad del pavimento a sufrir daños por fatiga y deformaciones permanentes como el ahuellamiento.

El desgaste temprano de las carreteras se debe en gran medida a cómo se comportan los materiales que las conforman, ya que deben resistir tanto el intenso tráfico como los cambios bruscos de temperatura, una situación común en el país andino. Adicionalmente, elementos del clima como los rayos ultravioletas no solo provocan cansancio y desgaste, sino que también aceleran el deterioro del pavimento. Esto se evidencia a través de varios problemas, como grietas y distorsiones en la superficie de la carretera, lo cual resulta en la no realización de la duración prevista en su diseño.

Una de las causas de esta situación se encuentra en la descripción simplificada de los componentes y del asfalto caliente, que solo se ajusta a los requisitos de volumen, resistencia y comportamiento fluido, según lo establecido en las normas EG-2013. Adicionalmente, la

descripción del pavimento no es la adecuada, ya que aún se utilizan pavimentos convencionales, cuando sería más conveniente alterarlos con polímeros para mejorar su rendimiento. En cuanto a los métodos de diseño, persiste una comprensión limitada, dado que en el país aún se utiliza el método tradicional estático (Marshall), basado en parámetros volumétricos determinados.

En el Perú, la metodología convencional no posibilita anticipar cómo se comportará el asfalto a lo largo de su tiempo de uso, particularmente en lo que concierne a la acumulación de deformaciones y la habilidad del material para soportar acciones de carga cíclica. Estos factores suelen ser las principales razones del deterioro de las carreteras asfaltadas, sobre todo cuando hay humedad presente. Además, es necesario dejar de enfocarse en especificaciones volumétricas y avanzar hacia pruebas de desempeño más específicas. En la actualidad, las combinaciones de asfalto incluyen polímeros, caucho, elementos plásticos y otros componentes que mejoran las características reológicas del asfalto, prolongando su vida útil. Esto significa que mediante pruebas de rendimiento se puede realizar una evaluación más precisa de la calidad del pavimento asfáltico caliente

Es imprescindible encontrar un diseño ideal para las mezclas en caliente que incluya polímeros, dado que es la corriente predominante a nivel global en la actualidad. Los polímeros contribuyen a potenciar las características físicas y mecánicas del asfalto, lo cual requiere ser respaldado mediante pruebas de rendimiento siguiendo el enfoque Superpave. Se emplearía una composición de asfalto modificado con polímeros como base, siguiendo el enfoque de Marshall, que fusiona un diseño basado en volúmenes fijos con la evaluación del rendimiento a través de pruebas en movimiento.

1.3 Formulación del problema

1.3.1 Problema general

¿De qué manera los polímeros y aditivo Adherente mejora el desempeño de las propiedades Físico-mecánicas de una mezcla asfáltica, en el distrito de Máncora?

1.3.2 Problemas específicos

¿De qué manera los polímeros y aditivo de Adherencia influye en la resistencia al ahuellamiento de una mezcla asfáltica, en el distrito de Máncora?

¿De qué manera los polímeros y aditivo de Adherencia influyen en la resistencia a la flexión elástica de una mezcla asfáltica, en el distrito de Máncora?

¿De qué manera los polímeros y aditivo de Adherencia influyen en la resistencia a la elasticidad de una mezcla asfáltica, en el distrito de Máncora?

¿De qué manera los polímeros y aditivo de Adherencia influyen en la resistencia a la fatiga de una mezcla asfáltica, en el distrito de Máncora?

1.4 Antecedentes

1.4.1 Antecedentes nacionales

Según Quispe (2022), el propósito de este estudio es establecer el nivel ideal de inclusión de polímero SBS y la cantidad apropiada de betún asfáltico que potencian el rendimiento de la mezcla asfáltica caliente, analizados mediante los indicadores Marshall, TSR, resistencia a la fatiga y deformación por carga repetida. Desde la base teórica, se examina la aplicación de elastómeros SBS como polímeros, los cuales potencian las características reológicas del betún, solucionando así inconvenientes vinculados con la fatiga y la deformación en las mezclas asfálticas a alta temperatura. Se añaden distintas proporciones de polímero SBS (2.5%, 3.5% y 4.5%) con el fin de lograr resultados que muestren una mejoría en el rendimiento en relación con la fatiga y la resistencia a la deformación. En primer lugar, se identifica la granulometría siguiendo las especificaciones de la norma ASTM D 3515 D-5, PEN 85/100 y el elastómero SBS. Después, se añade el polímero SBS al betún para establecer relaciones entre

las variables. Por último, se examinan los resultados de las pruebas Marshall (Estabilidad – Flujo), TSR, Rueda de Hamburgo y Vida a la Fatiga.

Para Santa Cruz (2023), una opción eficaz para mejorar el rendimiento de las superficies asfálticas es el uso de fibras de aramida y poliolefina, ya que contribuyen a incrementar la flexibilidad, la resistencia a deformaciones permanentes y la durabilidad frente a la humedad en condiciones de alta temperatura. Investigaciones anteriores han evidenciado avances en el rendimiento mecánico de dichas combinaciones, especialmente en lo que respecta al módulo dinámico, la capacidad de resistir deformaciones permanentes y la tolerancia a la humedad en circunstancias específicas. En este estudio se analizó la incorporación de un porcentaje concreto de fibras, establecido según investigaciones de referencia. Se propuso incorporar fibras de poliolefina y aramida en mezclas asfálticas en caliente para evaluar su efecto sobre el comportamiento mecánico, prestando especial atención al módulo dinámico, la resistencia a deformaciones permanentes y la durabilidad frente a la humedad. Los resultados evidenciaron que dicha adición mejora significativamente las propiedades físicas y mecánicas del asfalto.

Como indica Tallado y Ruiz (2024), la durabilidad de los pavimentos es un factor clave en el diseño de las mezclas asfálticas. No obstante, los fallos estructurales prematuros y la baja longevidad siguen siendo problemas recurrentes en la ingeniería de firmes. Entre las principales causas se encuentran las cargas producidas por el tráfico, la exposición a condiciones ambientales adversas y los diseños convencionales inadecuados de los pavimentos asfálticos. Como solución, la modificación de los ligantes asfálticos se ha implementado en los últimos años para mejorar las propiedades del asfalto. Entre los modificadores utilizados están los elastómeros, un tipo de polímero con características elásticas que pueden ser alteradas térmicamente. En este estudio, el asfalto fue modificado mediante la incorporación por vía húmeda de un 5%, 10% y 15% de poliuretano termoplástico (TPU) en relación al peso del

ligante. Luego se prepararon muestras estándar y mezclas con el asfalto modificado para realizar pruebas. Los resultados revelaron que el porcentaje óptimo de TPU es del 5%, lo que permitió una recuperación elástica del 5,60% y una disminución de la penetración en un 42,6% en comparación con el asfalto convencional. Además, el método Marshall mostró que las mezclas modificadas presentaban una estabilidad significativamente mayor que las mezclas estándar, lo que las hace más adecuadas para pavimentos en zonas de tráfico ligero, medio y pesado.

Según Riveros-Valdiviezo et al. (2024), sostiene que el asfalto está compuesto por una combinación de hidrocarburos de origen natural. En Perú, la mayoría de las carreteras pavimentadas utilizan mezclas asfálticas en caliente, algunas de las cuales se construyen a más de 3000 metros sobre el nivel del mar. No obstante, mantener la temperatura adecuada de la mezcla para su colocación y compactación representa un desafío. Este problema surge principalmente debido a la ubicación de las plantas de asfalto, que suelen estar alejadas de la zona de aplicación por la falta de áridos en esas áreas. Este estudio destaca la importancia de mejorar las propiedades mecánicas y mantener la temperatura adecuada de las mezclas asfálticas en caliente mediante el uso de betún modificado con polvo de vidrio, un tema poco investigado en Perú. Se realizaron pruebas en 93 muestras Marshall y se controlaron cinco puntos de viscosidad, comparando mezclas asfálticas convencionales con aquellas modificadas con polvo de vidrio. La adición de vidrio al betún mejoró la estabilidad, el flujo y la resistencia a la tracción de la mezcla asfáltica. Con un 2 % de vidrio también se logró reducir la temperatura de trabajo, generando un efecto de enfriamiento. En conjunto, estos resultados demuestran que el vidrio mejora tanto el rendimiento mecánico como térmico del asfalto, siendo una opción eficiente para su aplicación en campo.

De acuerdo con Quevedo-Valdez et al. (2023), se llevó a cabo un estudio para analizar el impacto de la fibra de nylon en una combinación de asfalto mediante el método Marshall,

con el objetivo de garantizar que cumpla con las especificaciones establecidas en el reglamento MTC E 504 para mezclas asfálticas. Se llevaron a cabo pruebas Marshall en la mezcla asfáltica original y en aquellas que se alteraron con distintas proporciones de fibra de nylon. En la mezcla convencional se logró una estabilidad de 9,14 kN, en contraste, las combinaciones con 1,0%, 1,5% y 2,0% de fibra de nylon obtuvieron 9,48 kN, 10,193 kN y 11,087 kN, respectivamente. En lo que respecta al flujo, la combinación convencional tuvo una medida de 9,8 mm, mientras que las combinaciones con 1,0%, 1,5% y 2,0% de fibra sintética presentaron dimensiones de 9,627 mm, 10,247 mm y 11,06 mm respectivamente. En lo que respecta a los espacios vacíos, la combinación convencional mostró un 4,044%, en contraste, las combinaciones que contenían 1,0%, 1,5% y 2,0% de fibra de nylon arrojaron cifras de 3,781%, 3,975% y 3,809%, respectivamente. Para concluir, se evidenciaron mejorías en las características de la mezcla de asfalto al incorporar distintas proporciones de fibra de nylon a través del procedimiento de Marshall, estableciendo que la cantidad ideal de fibra de nylon es del 2,0%.

Según Valderrama-Minchola et al. (2024), sostiene que el objetivo de este estudio es analizar cómo la fibra de polipropileno afecta las características físicas y mecánicas de una mezcla asfáltica en frío que contiene únicamente pavimento reciclado. Se empleó un diseño experimental puro para realizar este estudio de tesis. Se utilizó una técnica de muestreo no aleatoria, fundamentada en la evaluación de especialistas, y la recolección de información se llevó a cabo mediante la observación con el uso de una guía concreta. Se llevó a cabo el análisis de los datos a través de la estadística inferencial. Según los datos obtenidos, se observó que la mezcla estándar logró una resistencia de 5.15 kN y una deformación de 9.08 mm. En contraste, las mezclas que incorporaron 0.25 %, 0.30 % y 0.35 % de fibra de polipropileno alcanzaron valores de 5.54 kN y 7.25 mm, 7.06 kN y 8.22 mm, y 6.19 kN y 9.25 mm, respectivamente. En lo que respecta al índice de vacíos, la combinación estándar mostró un 3.65% de vacíos,

mientras que las combinaciones con 0.25%, 0.30% y 0.35% de fibra de polipropileno tuvieron un registro de 3.85%, 4.29% y 4.43% respectivamente. En síntesis, el uso de polipropileno influye significativamente en las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas en frío compuestas íntegramente por RAP, evidenciando que una adición del 0.30 % optimiza su rendimiento en el ensayo Marshall.

Según Vizcarra (2020), señala que Arequipa enfrenta altos niveles de contaminación debido a plásticos que no se reciclan ni reutilizan, los cuales terminan afectando el medio ambiente. Además, el crecimiento de la cantidad de vehículos, sumado a las variaciones climáticas y las precipitaciones, provoca el desgaste de las calles asfaltadas en nuestro municipio. Se implementó una metodología experimental que consistió en la recolección de cuatro muestras de betún líquido RC-250, considerando el asfalto utilizado en carreteras con distintos niveles de circulación vehicular (bajo, moderado y alto). Cada muestra recibirá adiciones de PET en proporciones del 2%, 4%, 6%, 8% y 10% respecto al volumen total de asfalto. El propósito de esta investigación es identificar un diseño mejorado para la capa de asfalto utilizando material plástico reciclado, con el fin de desarrollar una combinación ideal entre asfalto líquido RC-250 y PET. Se procedió a analizar cada una de las muestras recolectadas con el fin de determinar sus características, de acuerdo con las directrices establecidas por la ASTM.

1.4.2 Antecedentes internacionales

Como indica Solarte (2022), la sociedad contemporánea se preocupa principalmente por la utilización y reutilización de desechos. A nivel global, la generación anual de residuos provenientes de actividades de construcción y demolición (RCD) supera los 6.5 mil millones de toneladas. De esa cantidad, alrededor de 2,6 a 3 mil millones de toneladas son desechos inertes, como los residuos de cerámica. En esta situación, la elaboración de pavimentos que incluyan desechos de la industria, como el material cerámico molido, sin respaldo científico,

podría generar pérdidas económicas para las autoridades gubernamentales. La investigación desarrollada en este trabajo aborda ensayos del módulo dinámico realizados en muestras de mezcla asfáltica convencional y en combinaciones que incluyen un 30% y un 35% de desecho de cerámica triturada, llevados a cabo tanto en territorio español como en Colombia. De esta manera, es factible examinar, cotejar y valorar el desempeño de dichas combinaciones a escala global en distintas condiciones de temperatura, corroborando su adecuación para carreteras con niveles moderados y reducidos de tráfico. Por último, se recomienda emplear combinaciones de asfalto con un 30% de restos de cerámica molidos como una opción de reutilización, respaldada por evidencia científica que avale su aplicación en las vías de circulación. También se plantea la incorporación de medidas regulatorias, de índole económica, educativas y de divulgación. De este modo, se ayuda a reducir el impacto de los desechos y se extiende la red de calles asfaltadas, brindando acceso y desplazamiento a áreas que de otra forma estarían aisladas.

Como indica Mateos y Harvey (2019), han analizado los efectos de incorporar las fibras de aramida en las características estructurales de una mezcla asfáltica de uso habitual en California, específicamente una mezcla Superpave que incorpora agregados de hasta 19 mm de diámetro nominal, un 15% de pavimento asfáltico recuperado (RAP) y un ligante PG 64-10. Se elaboró un hormigón asfáltico reforzado con fibras (FRAC) agregando fibras de aramida en una cantidad correspondiente al 0,015 % del peso global de la mezcla. Las características mecánicas tanto de la mezcla original como de la FRAC fueron evaluadas mediante ensayos de laboratorio. Los resultados obtenidos evidenciaron que incorporar fibras incrementó de forma significativa la durabilidad ante esfuerzos repetidos y redujo la susceptibilidad al desarrollo de rodaduras, mientras que la rigidez se vio afectada solo levemente. La incorporación de fibras no tuvo un impacto negativo en la compactibilidad de la mezcla ni alteró notablemente su volumen. Los hallazgos sugieren que el uso de fibras de aramida sería especialmente valioso

en situaciones donde el asfalto enfrenta altos niveles de tensión, como en recubrimientos de pavimentos de hormigón articulado o en pavimentos con agrietamiento significativo. Cabe mencionar que en este estudio no se consideraron los riesgos para la salud laboral, el impacto ambiental, los costos, los efectos sobre la constructibilidad (especialmente la compactación en el campo) ni las implicaciones que las fibras añadidas podrían tener en la capacidad de reciclar el pavimento de asfalto reforzado con fibras.

Como indica García-Al-Qadi et al. (2024), el aumento en el uso de ligantes más blandos en Illinois durante la última década se debe principalmente a la mayor incorporación de materiales reciclados en la fabricación de pavimentos asfálticos. La transición hacia el uso de ligantes PG 58-28 en lugar de PG 64-22 ha generado métodos alternativos para producir ligantes más suaves de manera más económica mediante el uso de productos patentados. No obstante, existen desafíos en la utilización de estos productos para modificar el asfalto, especialmente debido a la incertidumbre sobre su rendimiento a largo plazo y la considerable variabilidad en la química del ligante. La actual especificación de clasificación de rendimiento de Superpave para ligantes asfálticos resulta insuficiente para diferenciar aquellos que se producen con estos modificadores. Así, esta investigación busca evaluar la eficacia de diversos modificadores de ligantes asfálticos de tipo suavizante, mediante una amplia gama de pruebas reológicas y químicas, con miras a su integración en las especificaciones de materiales del Departamento de Transporte de Illinois. Las pruebas reológicas de pequeña deformación y sus parámetros permitieron agrupar de manera consistente los ligantes modificados, pudiendo usarse como sustitutos para identificar ligantes asfálticos de alto y bajo rendimiento. Se desarrolló un nuevo parámetro, $\Delta|G^*|_{\text{peak } \tau}$, a partir de pruebas de barrido de amplitud lineal, que mostró potencial para diferenciar aglutinantes según su comportamiento bajo grandes deformaciones. Además, se demostró que los parámetros basados en la química pueden rastrear el envejecimiento y los cambios en la formulación. Las fuentes de modificadores se

identificaron mediante pruebas de huellas dactilares, que se reflejaron en las características químicas y compositivas del aglutinante modificado. Las dos fuentes de aglutinantes base combinadas con los modificadores influyeron en la tasa de envejecimiento de los aglutinantes modificados. Los ensayos de rendimiento de la mezcla, utilizando la prueba del índice de flexibilidad de Illinois y la prueba de huellas de ruedas de Hamburgo, fueron coherentes con los hallazgos reológicos y químicos, excepto en el caso del aglutinante modificado a base de amina de glicol, que presentó el peor rendimiento en agrietamiento y el índice de flexibilidad más bajo entre los modificadores analizados. Este resultado contrasta con su rendimiento reológico superior, lo cual puede atribuirse a una menor estabilidad térmica, que resulta en una notable pérdida de masa durante la mezcla. Según la caracterización de los ligantes envejecidos en campo, el envejecimiento en laboratorio con dos ciclos de envejecimiento en recipientes presurizados podría representar un envejecimiento en campo realista de 10 a 15 años en la superficie del pavimento y es capaz de diferenciar ligantes modificados. Por lo tanto, se recomendó un método de envejecimiento extendido que incluya dos ciclos de envejecimiento en recipientes presurizados para ligantes modificados. Además, se propusieron dos conjuntos de pruebas diferentes para el protocolo de aprobación del producto, con umbrales preliminares para un rendimiento aceptable, los cuales fueron validados con datos de envejecimiento en campo.

Para Galvis y Suarez (2023), la aplicación de materiales alternativos ha sido objeto de múltiples estudios y ha tenido una implementación global considerable. En este informe se exponen los hallazgos de un análisis que compara aspectos técnicos y financieros de una mezcla fría enriquecida con asfaltita. Se procedió con la formulación de la mezcla mediante el uso de las técnicas de Marshall y Ramcodes, luego de realizar un análisis detallado de los materiales pétreos. Gracias a esto, se logró crear referencias para evaluar el grado de cumplimiento de los requerimientos técnicos y las características volumétricas logradas,

además de verificar la viabilidad de emplear asfaltita en la edificación de capas de pavimentos flexibles en la nación. La mezcla elaborada con asfalto, para la distribución del punto medio de las especificaciones, satisface los estándares de diseño para una mezcla fría compacta utilizada en reparaciones de baches, salvo por la fluidez. Estas combinaciones tienen la capacidad de brindar un desempeño más eficiente que las combinaciones tradicionales, a un precio bastante accesible. La utilización de asfalto de Pesca, Boyacá, como componente fino en una combinación densa en frío con emulsión asfáltica muestra potencial, dado que realza su consistencia y tiene un costo de producción inicial más bajo que una mezcla tradicional.

De acuerdo a Gupta (2022), esta tesis propone un enfoque integral para optimizar el rendimiento de mezclas de pavimento asfáltico (PA) mediante el uso de aditivos seleccionados y el desarrollo de un betún modificado con alto contenido de polímero vinílico (>35 %). En una primera etapa, se analizó el impacto de aditivos como fibras de aramida, fibras híbridas de vidrio, celulosa y cal hidratada sobre el desempeño mecánico, hidráulico, económico y ambiental de las mezclas. Se aplicó un análisis multicriterio para valorar su rendimiento global. Se realizaron ensayos Cántabro, de tracción indirecta, permeabilidad y análisis volumétricos, además de una evaluación económica y ambiental bajo el método Récipe. En la segunda fase, se formuló un nuevo betún experimental y se caracterizó mediante pruebas de penetración, punto de ablandamiento, viscosidad y comportamiento reológico.

Según Casado (2022), el uso extendido de mezclas asfálticas en carreteras subraya la relevancia de optimizar su diseño para promover la sostenibilidad y eficiencia económica en el sector transporte. Actualmente, se están llevando a cabo diferentes progresos con el objetivo de potenciar la sostenibilidad de las vías de tránsito, investigando materiales que puedan ser añadidos a las mezclas de asfalto para aumentar su eficacia y resistencia. Dentro de estos elementos se incluyen los nanomateriales y los materiales autorreparables, catalogados como innovadores. El foco de esta investigación doctoral es el estudio de estos componentes, con el

fin de examinar cómo el negro de carbono afecta el desempeño mecánico de las mezclas asfálticas y valorar la efectividad de los agentes rejuvenecedores encapsulados en la prevención del deterioro de dichas mezclas.

En la primera línea de investigación, que aborda el uso del negro de carbono, el estudio también incluye la incorporación de materiales secundarios y subproductos, como el fresado de asfalto y las escorias negras de acería, así como el aditivo semicaliente Evotherm, para mejorar la huella ambiental de las mezclas. La segunda línea de investigación se enfoca en el uso de áridos porosos que contienen un agente rejuvenecedor, el cual actúa como cápsulas que liberan el rejuvenecedor por difusión, compensando el envejecimiento de las mezclas y aumentando así la durabilidad de los pavimentos.

El estudio se enfoca en analizar cómo se comportan estos materiales cuando se añaden a las mezclas asfálticas, desde la etapa inicial en el laboratorio hasta su uso en situaciones reales. La tesis se estructura en tres etapas: la inicial abarca la elección y descripción de los materiales investigados; la segunda aborda el diseño y caracterización de las mezclas bituminosas con los diferentes aditivos a escala de laboratorio; y la tercera se refiere a la validación de la tecnología mediante la ejecución de un tramo de prueba. Como resultado de esta investigación, se concluye que el uso de estos aditivos proporciona una ventaja competitiva en comparación con las alternativas convencionales, permitiendo un avance tecnológico hacia una nueva generación de materiales para su uso en mezclas bituminosas.

1.5 Justificación de la investigación

1.5.1 Justificación teórica

La investigación es realizar estudios resulta beneficioso debido a la posible mejora en el rendimiento de la resistencia al desgaste, flexibilidad, elasticidad y resistencia a la fatiga del asfalto modificado con polímeros y aditivo adhesivo. Esto podría prolongar la durabilidad de

las calles de la ciudad y carreteras con mucho tráfico.

1.5.2 Justificación de relevancia social

La investigación se justifica debido que las vías y/o carreteras con carpetas asfálticas modificada con polímeros elastoméricos y aditivo adherente, evitara daños y deterioros a temprana edad (generación de baches, fisuras, piel de cocodrilos, etc.), lo cual reducirá los costos de mantenimiento favoreciendo a los usuarios de la vía.

1.5.3 Justificación prácticas

La presente investigación se justifica debido que ayudará a mejorar e incrementar la vida útil de las mezclas asfáltica modificada con polímeros elastoméricos y aditivo adherente cuya demostración mediante ensayos en los laboratorios y el análisis de los resultados obtenidos, permitirá sustentar su aplicación en futuros proyectos viales, tanto en carreteras como en zonas urbanas. El uso de mezclas mejoradas presenta mayor resistencia al agrietamiento y a las deformaciones permanentes, así como una notable mejora en la durabilidad del pavimento. Lo cual extiende su vida útil de un pavimento y así reducen las necesidades de un mantenimiento rutinario, lo que implica un ahorro significativo en mano de obra, materiales y tiempo.

1.5.4 Justificación metodológica.

Se llevará a cabo la investigación y recopilación de publicaciones, tanto nacionales como internacionales, como artículos, tesis, revistas y libros recientes sobre el tema en cuestión. También se incluirán gráficos estadísticos en el análisis de datos, siguiendo las regulaciones tanto peruanas como internacionales, para posteriormente proceder con el procesamiento y la obtención de los resultados de este estudio. Además, teniendo fichas técnicas de ensayos, las características que presentan estas fichas son: Su procedimiento del ensayo, condiciones de prueba, tipo de quipos y resumen de los hallazgos y conclusiones

basadas en los resultados obtenidos. Su importancia de las fichas técnicas de ensayos desempeña un papel crucial en la industria de mezclas asfálticas y otros sectores que requieran la evaluación de materiales, las cuales garanticen su calidad, facilitan la selección de materiales, fiel cumplimiento normativo. Reducción de errores, optimización de costos y documentación estandarizada

1.5.5 Justificación de valor teórico

La razón de llevar a cabo este estudio es evaluar el rendimiento de las características físico-mecánicas de la combinación de asfalto modificada con polímeros elastoméricos y aditivo adherente, un tema que no ha sido explorado en detalle en el Perú hasta ahora. Según los hallazgos, estos resultados podrían utilizarse como una estrategia para aumentar la durabilidad de las calles y carreteras peruanas.

1.6 Limitaciones de la investigación

1.6.1 Geográfica

La investigación se realizará en la ciudad de Máncora, Provincia de Talara en la Región de Piura. Diseñada en los Laboratorios de la empresa BITUPER S.A.C encargada de la dosificación y diseño para el Tramo IV: Máncora – Puente Bocapan Km 128+00 – Km 212+000 de la Ruta PE-1N (Carretera Panamericana).

1.6.2 Temporal

El tiempo de ejecución se desarrollará un aproximado de doce (12) meses, debido a una reducción de tiempo por factores climáticos.

1.6.3 Temática

En este estudio se propone analizar el rendimiento de las características físico-mecánicas de una mezcla de asfalto que ha sido alterada con polímeros elastoméricos y un aditivo adhesivo. También se busca evaluar la resistencia al hundimiento, la flexión elástica, la

elasticidad y la resistencia a la fatiga de dicho material.

1.6.4 Muestral

El estudio prevé la obtención de muestras y la delimitación de unidades de análisis correspondientes a cada tipo de mezcla asfáltica modificada con polímeros elastoméricos y aditivo adherente los cuales las muestras serán tomadas en la Cantera Fernández ubicada en el Km 149+110 de la Ruta PE-1N, con un acceso del eje a 18km hacia la mano derecha, lo cual este acceso es un poco inaccesible ya que es un tramo de trocha carrozable con muy poca influencia de tránsito vehicular.

1.7 Objetivos

1.7.1 Objetivo general

Determinar que polímeros y aditivo de adherencia influyen en las propiedades físico-mecánicas de mezclas asfálticas, en el distrito de Máncora.

1.7.2 Objetivos específicos

Determinar que polímeros y aditivo de adherencia influyen en la resistencia al ahuellamiento de una mezcla asfáltica, distrito de Máncora.

Determinar que polímeros y aditivo de adherencia influyen en la resistencia a la flexión elástica de una mezcla asfáltica, en el distrito de Máncora.

Determinar que polímeros y aditivo adherente influyen en la resistencia a la elasticidad de una mezcla asfáltica, en el distrito de Máncora.

Determinar que polímeros y aditivo adherente en la resistencia a la fatiga de una mezcla asfáltica, en el distrito de Máncora.

1.8 Hipótesis

1.8.1 Hipótesis general

Los polímeros y aditivo de adherencia influyen en las propiedades físico-mecánicas de mezclas asfálticas, en el distrito de Máncora

1.8.2 Hipótesis específica

Los polímeros y aditivo de adherencia influyen en la resistencia al ahuellamiento de una mezcla asfáltica, distrito de Máncora.

Los polímeros y aditivo de adherencia influyen en la resistencia a la flexión elástica de una mezcla asfáltica, en el distrito de Máncora.

Los polímeros y aditivo de adherencia influyen en la resistencia a la elasticidad de una mezcla asfáltica, en el distrito de Máncora

Los polímeros y aditivo de adherencia influyen en la resistencia a la fatiga de una mezcla asfáltica, en el distrito de Máncora.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Marco conceptual

2.1.1 Cemento Asfáltico

Se trata de un material bituminoso proveniente del refinamiento del crudo, compuesto en su mayoría por hidrocarburos de elevada masa molecular y componentes inorgánicos. Su comportamiento es viscoso o viscoelástico, dependiendo de la temperatura. Cuando la temperatura es baja, el material presenta un estado sólido, aunque con el aumento térmico adquiere propiedades más viscoelásticas, su comportamiento se vuelve líquido (Villegas et al., 2012). Por otro lado, Se caracteriza por su alta durabilidad, baja permeabilidad al agua y una notable capacidad de adherencia a otros materiales al ser expuesto al calor. Existen varias fuentes de ligante asfáltico, pero de forma general estas pueden clasificarse en tres categorías (Loria-Salazar et al., 2024).

Figura 1

Fuentes Principales de obtención de cementos asfálticos

FUENTES PRINCIPALES DE OBTENCIÓN DE CEMENTOS ASFÁLTICOS				
FUENTE	ORIGEN	CARACTERÍSTICAS	EJEMPLO	ILUSTRACIÓN
Asfalto Natural.	Se encuentra en depósitos naturales subterráneos.	Consiste en mezclas de cemento asfáltico, minerales y otros componentes orgánicos.	El Lago Asfáltico de La Brea en Trinidad y Tobago.	
Asfaltita.	También conocida como "cemento asfáltico sólido" o "mastoquita", la asfaltita es una variedad de asfalto natural.	Es más sólida que otros tipos de cemento asfáltico natural y contiene un alto porcentaje de asfaltenos.	Se encuentra en depósitos en lugares como el Lago Guanoco en Venezuela, Colombia y Guyana entre otros.	
Asfalto de Refinería.	Proviene como subproducto del proceso de refinación de petróleo.	Se obtiene de la destilación de residuos pesados de petróleo.	Ampliamente utilizado en la fabricación de mezclas asfálticas.	

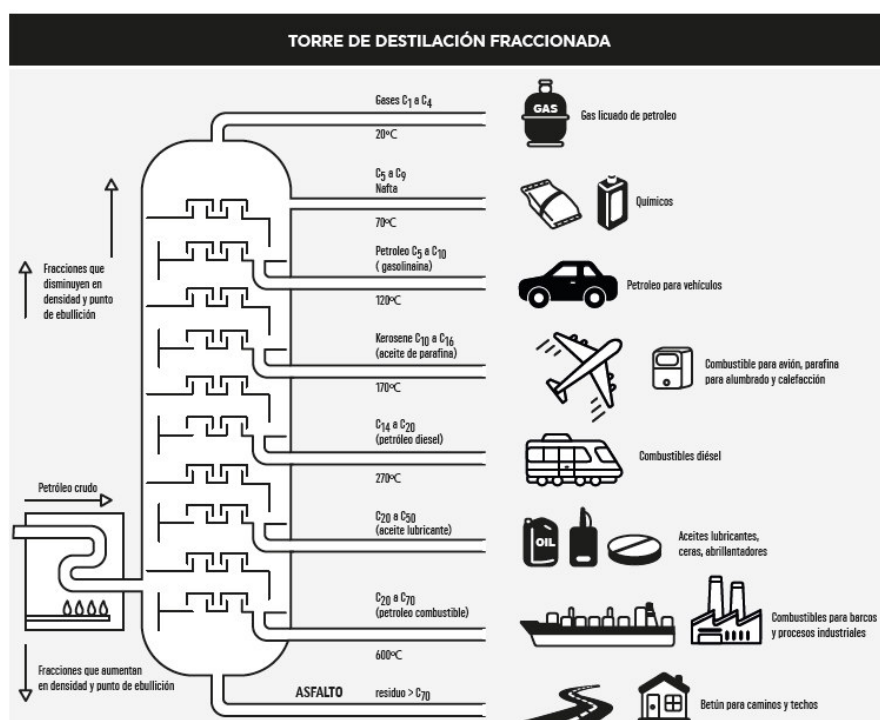
Nota. Fuente. Loria-Salazar et al., 2024

Para Cuadrado-Valbuena et al. (2024). Por lo general, la mayoría de los adhesivos

asfálticos empleados en la edificación de vías son derivados del proceso de refinamiento del petróleo, lo que origina que su estructura química pueda ser considerada como diversa y cambiante de un origen a otro. Se produce a partir de diferentes métodos de refinación del crudo, entre ellos la destilación bajo presión atmosférica, al vacío y el craqueo catalítico. Así, los asfaltos se presentan como el subproducto de la refinación del crudo, por lo que para las refinerías el objetivo principal es la obtención de los productos más livianos como la gasolina o el diésel y, por tanto, las operaciones relacionadas con su refinación son cada vez más eficientes, por lo cual se producen asfaltos más rígidos.

Figura 2

Proceso de refinación del petróleo y obtención de cemento asfáltico



Nota. Fuente. Oiltanking, 2022

El cemento asfáltico es conocido por su consistencia, adhesividad y sus propiedades viscoelásticas; su uso ha permitido desarrollar soluciones sostenibles y funcionales en múltiples contextos, representados en la Figura 2. Su versatilidad le concede impermeabilidad,

adherencia y flexibilidad, donde su funcionabilidad trasciende el de ser un simple revestimiento vial. Este material se ha desempeñado desde la pavimentación de carreteras hasta la protección de estructuras contra los elementos ambientales, posicionándolo como un material fundamental en la infraestructura, tanto vial como civil (Cuadrado-Valbuena et al., 2024).

Figura 3

Propiedades generales del cemento asfáltico



Nota. Fuente. Cuadrado-Valbuena et al., 2024

2.1.2 Cemento Asfáltico Modificado con Polímeros SBS

Actualmente, los aditivos poliméricos más comunes son el copolímero de estireno-butadieno-estireno (SBS), SBR y EVA. Los polímeros son macromoléculas que se obtienen mediante la reacción química de muchas moléculas (poli) más pequeñas (monómeros) entre sí para formar cadenas largas o grupos. Las características físicas del polímero final dependen directamente del orden y la configuración química de los monómeros que lo componen. Los copolímeros consisten en una combinación de dos monómeros diferentes que pueden estar en una disposición aleatoria o en bloques. Por ejemplo, el poliestireno es un plástico duro y quebradizo, mientras que el polibutadieno es blando y gomoso; si estos dos monómeros claramente diferentes se mezclan aleatoriamente y reaccionan entre sí, se forma un nuevo polímero llamado copolímero, con propiedades variables dependiendo de la relación molar de monómeros incorporados en las cadenas.

Es posible crear polímeros con diversas propiedades físicas, pero se clasifican comúnmente en tres grupos: fibras, plásticos (plastómeros) y cauchos (elastómeros). Las divisiones se determinan según las características térmicas y la estructura del polímero. Las fibras tienden a poseer una estructura mayormente cristalina, lo que se traduce en una elevada temperatura de fusión y una transición vítrea reducida. Un plástico presenta en su mayoría una estructura amorfa y posee una temperatura de transición vítrea (T_g), que corresponde al punto en el cual el material cambia de un estado rígido y frágil a uno más flexible y moldeable. Constituye una característica fundamental en los polímeros amorfos utilizados a temperaturas superiores a su rango operativo habitual. Un caucho es amorfo con una T_g muy por debajo de su temperatura de uso; para evitar que las moléculas de caucho, al fluir a temperatura ambiente, el caucho se entrecruza químicamente (Villegas et al., 2024).

2.1.3 Grado de Desempeño (PG) del Asfalto

La temperatura influye en las características físicas del alquitrán. Cuando hace mucho frío, las moléculas que lo constituyen no pueden desplazarse entre sí, lo que provoca un incremento en la viscosidad y hace que el asfalto se comporte de manera similar a un material sólido. En cambio, cuando la temperatura sube, tiende a adquirir propiedades similares a las de un líquido, ya que la viscosidad disminuye debido al aumento en la movilidad de las moléculas del asfalto.

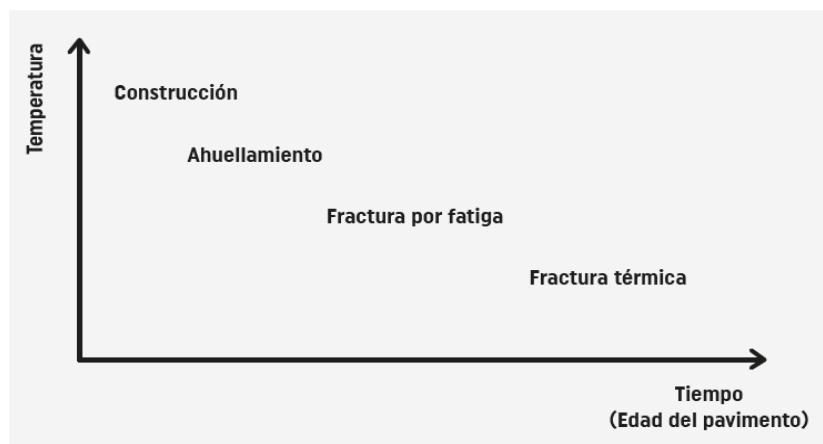
Durante muchos años se han utilizado algunas características físicas del ligante para especificar, cuál es el asfalto más adecuado para el proyecto que se está analizando. La principal propiedad medida es la “dureza”, determinada a partir del ensayo de penetración. En consecuencia, los asfaltos de penetración 60/70, 85/100 y 120/150 figuran entre los más utilizados en los proyectos de infraestructura vial del país.

Sin embargo, el programa SHRP (Strategic Highway Research Program) fue

desarrollado con el fin de establecer criterios de selección del ligante asfáltico más apropiado para cada proyecto, a través de ensayos que evalúan su comportamiento frente a las condiciones de tráfico y clima que enfrentará el pavimento.

Un estudio de investigación estableció un innovador enfoque de evaluación conocido como SUPERPAVE (Pavimentos Asfálticos de Alto Rendimiento), el cual se fundamenta en el Performance Grade (Grado de Desempeño) del aglutinante asfáltico. Por poner un caso, si un tipo de asfalto se etiqueta como PG 64-22, indica que cumple con los estándares de las características físicas hasta los 64°C en condiciones de calor y hasta -22°C en condiciones de frío.

La especificación Superpave PG se enfoca en la aplicación de pruebas de laboratorio, la mayoría de las cuales miden propiedades fundamentales reológicas, que determinan el desempeño relativo del cemento o ligante asfáltico para diferentes tipos de fallas. Estas fallas aparecen en edades diferentes del material instalado en campo, edades a las cuales el material presenta diferentes niveles de rigidez y elasticidad, y además ocurren a diferentes temperaturas. Adicionalmente, la especificación aborda etapas de preparación de mezcla y colocación del material. La Figura 3, muestra las etapas en la vida del material y las fallas a las cuales está propenso dependiendo de la temperatura del pavimento y la edad de este. Para simular la temperatura, la especificación simplemente somete el ligante a pruebas de laboratorio que tienen temperaturas relacionadas con el tipo de falla. Para simular la edad del pavimento, la especificación incorpora procedimientos de laboratorio que artificialmente envejecen (rigidizan y oxidan) el ligante (Castillo et al., 2024).

Figura 4*Etapas en la vida del ligante asfáltico*

Nota. Fuente. Castillo et al., 2024

2.1.4 Agregados de la Mezcla Asfáltica

Material de origen mineral, inerte y resistente, utilizado en forma de partículas graduadas o fragmentadas como parte fundamental de las mezclas asfálticas en caliente. Entre los materiales comúnmente añadidos se encuentran la arena, la grava, el material pétreo triturado, la escoria y el polvo mineral. La selección adecuada del tipo y características del agregado incide significativamente en el rendimiento estructural y funcional de la mezcla asfáltica, ya que es responsable de la mayor parte de las propiedades de resistencia.

Los componentes minerales que acompañan al ligante bituminoso representan aproximadamente entre el 90 % y el 95 % del peso total de la mezcla asfáltica, lo que equivale al 80 %–85 % de su volumen, desempeñando un papel fundamental en su comportamiento estructural. Dado que los agregados son los principales portadores de carga en las mezclas asfálticas, resulta esencial evaluar sus características físicas y mecánicas para garantizar un diseño adecuado y un desempeño óptimo del pavimento (Arroyo y Rodríguez, 2010).

2.1.4.1 Agregado Grueso. Según lo establecido en la norma MTC E207, el agregado

grueso se define como aquel retenido en el tamiz N.º 8. Este tipo de material debe cumplir con propiedades específicas que aseguren su adecuada participación en el desempeño de la mezcla asfáltica.:

- Debe estar libre de impurezas y no debe contener más del 5 % de su masa compuesta por fragmentos de geometría alargada o plana.
- El nivel de desgaste, establecido de acuerdo con la regla MTC E207, no puede exceder el 25% en el caso de las combinaciones asfálticas empleadas en la capa de rodadura, ni superar el 40% en el caso de las combinaciones asfálticas utilizadas como capa intermedia o base.

2.1.4.2 Agregado Fino, Equivalente de Arena (ASTM D-2419). El método de ensayo establece un valor representativo para la proporción, granulometría y características del material fino presente en una muestra de suelo granular que pasa por el tamiz N.º 4 (4.75 mm). El concepto de "Equivalente de Arena" se basa en que la mayoría de los agregados finos y suelos granulares están compuestos por una mezcla de partículas gruesas, fracciones arenosas y finos, lo que permite evaluar la calidad relativa de los componentes más finos en términos de limpieza y contenido de arcilla.

Con el propósito de calcular el contenido de partículas finas en una muestra, se añade una cantidad de tierra y una solución de cloruro de calcio (CaCl_2) en un recipiente plástico con marcas de medida. Tras agitarlo, se produce la separación entre los finos y las partículas de arena. Después de un lapso determinado, es posible observar las alturas de la arcilla y la arena en el recipiente graduado. La relación equivalente de arena se determina calculando el porcentaje que representa la altura de la capa de arena en relación con la altura total compuesta por las capas de arena y arcilla.

A. Determinación del peso específico del agregado fino (ASTM D-128). La prueba se orienta a cuantificar el peso específico aparente y la capacidad de absorción del material

fino, expresada como un porcentaje respecto a su peso, luego de una inmersión de 24 horas en agua.

La determinación del peso específico aparente se realiza mediante la relación entre el peso del sólido en aire y el volumen de agua desplazado por su volumen aparente. Este procedimiento debe efectuarse conforme a lo establecido en la norma ASTM D-128.

B. Análisis granulométrico (ASTM D-422). Este procedimiento permite asegurar que el agregado presenta una distribución de tamaños dentro de un rango definido, de modo que cada clase de partícula esté presente en la mezcla asfáltica en cantidades controladas.

La distribución de los tamaños de partícula en un agregado se denomina gradación del agregado o de la mezcla. Esta se determina mediante el ensayo de tamizado en seco, el cual presenta características específicas para su aplicación (Ramírez, 2016):

- Se emplea un dispositivo llamado "cuarteador" para disminuir el tamaño de las muestras destinadas al proceso de tamizado.
- Para separar los materiales delicados de los más robustos, se emplea un tamiz de 2.36 mm (N°8).
- Las muestras se someten a un proceso de secado en horno hasta alcanzar una masa constante.
- Se realiza la tamización de las muestras finas y las muestras gruesas de forma individual.
- Se registra el peso de las fracciones retenidas en cada tamiz y en el recipiente inferior, además de determinarse la distribución granulométrica de la muestra, diferenciando entre la fracción fina y la gruesa.

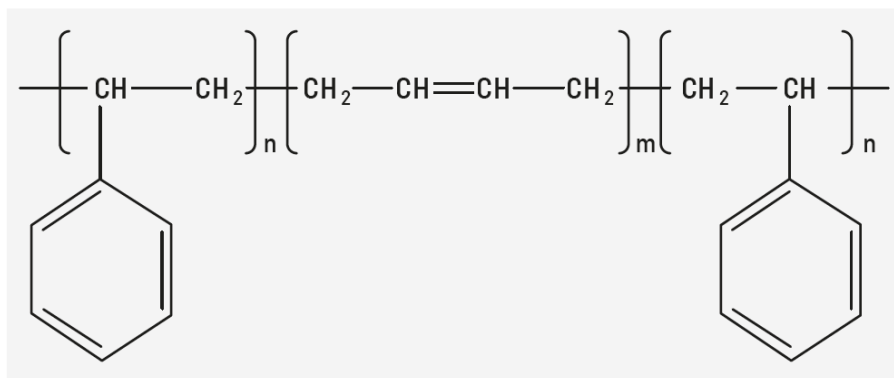
2.1.5 Polímeros Elastoméricos (SBS)

El SBS es un tipo de elastómero termoplástico sintético que se caracteriza por ser un

copolímero en bloque compuesto por tres secciones. La cadena principal se compone de una cadena breve de poliestireno, seguida por una cadena extensa de polibutadieno y, para concluir, otra cadena breve de poliestireno.

El material SBS muestra estabilidad frente a la acción del agua, compuestos químicos ácidos y sustancias alcalinas como el hipoclorito de sodio. Asimismo, el SBS destaca por su elevada resistencia a la abrasión, lo que le permite soportar un mayor grado de desgaste en comparación con otros elastómeros. Presenta propiedades mecánicas sobresalientes, algunas superiores a las del caucho natural; sin embargo, su desempeño se ve comprometido ante la exposición al ozono y a la radiación ultravioleta.

El copolímero tribloque SBS es un material elastoméricos que se entrecruza químicamente; las unidades de poliestireno presentan una T_g mayor que la temperatura de servicio, lo que les permite funcionar como nodos rígidos de enlace cruzado en la red polimérica. Cuando el material se calienta por encima de la T_g del bloque de poliestireno, el material se convierte en un líquido que fluye libremente y que es fácil de dispersar a las temperaturas de procesamiento del asfalto. La estructura del SBS puede variar desde una cadena lineal polimérica a una cadena polimérica ramificada, que se designa como copolímero radial. Los copolímeros radiales SBS exhiben menores viscosidades de fusión que los copolímeros SBS lineales y, por lo tanto, permiten temperaturas de procesamiento más bajas. El SBS se emplea como modificador del asfalto para conferirle mayor elasticidad, flexibilidad y resistencia. También protege el asfalto de los cambios climáticos y los rayos UV y UVA. Además, proporciona una notable capacidad de recuperación elástica y una mayor resistencia a las deformaciones permanentes en comparación con los ligantes convencionales (Villegas et al., 2024).

Figura 5*Estructura química lineal de un polímero SBS**Nota.* Fuente. Islam et al., 2021

2.1.6 Aditivo de Adherencia (Quimibond 3000)

Para resistir el efecto de desprendimiento del asfalto en el agregado, se utilizan tanto aditivos líquidos mejoradores de adherencia como aditivos de cal. La mayoría de los agentes mejoradores de adherencia líquidos son de superficie. Agentes activos que, cuando se mezclan con cemento asfáltico, reducen la tensión superficial y, por lo tanto, promueven una mayor adhesión a la superficie. Estos compuestos fortalecen la unión interna de la mezcla, reduciendo la delaminación y el deslizamiento, lo que contribuye a la durabilidad y la calidad general de la pavimentación.

Los mejoradores de adherencia pertenecen comúnmente a las familias químicas de las aminas o los organosilanos. Considerando la importancia de este tema, se explica detalladamente cada uno de estos a continuación:

Aminas: Son compuestos químicos que contienen átomos de nitrógeno; se clasifican como bases debido a su capacidad para aceptar protones. Las aminas pueden funcionar como agentes antideslizantes o como agentes modificadores de la superficie del asfalto para mejorar su adherencia.

Organosilanos: Son caracterizados por enlaces con silicio, actúan como agentes de

unión para mejorar la adhesión entre distintas superficies. Los organosilanos favorecen la adherencia entre el ligante bituminoso y los agregados, incrementando la resistencia al agua y a la fatiga, y disminuyendo la vulnerabilidad al desgaste y la separación de capas. Se ha encontrado que, en dosis altas, los organosilanos reducen la temperatura de mezclado o alargan la manejabilidad de las mezclas fabricadas con asfaltos modificados (Loria-Salazar et al., 2024).

2.1.6.1 Quimibond 3000. Es un aditivo líquido formulado a partir de aminas, cuya función principal es fortalecer la adhesión entre el ligante bituminoso y los agregados minerales, evitando la presencia de humedad que podría interferir en dicha unión. Su aplicación mejora el desempeño general de la mezcla asfáltica. La composición del QUIMIBOND 3000 asegura una óptima unión del suelo por un extenso período de tiempo (Química Suiza, 2022).

2.2 Marco filosófico

2.2.1 Determinación del Grado de Desempeño

La recopilación de información climática proveniente de estaciones meteorológicas próximas al emplazamiento del proyecto facilita la determinación de los valores térmicos de diseño requeridos en este procedimiento. Es fundamental destacar que las temperaturas requeridas para esta categorización corresponden a las del suelo y no a las atmosféricas. Para temperaturas elevadas, las mediciones se realizan a una profundidad de 20 mm desde la capa superficial del pavimento; mientras que, en condiciones de bajas temperaturas, estas se efectúan directamente sobre la superficie. Por ello, es necesario aplicar ciertas fórmulas de corrección que permitan ajustar dichos valores.

2.2.1.1 Cálculo de la temperatura Máxima del Pavimento. Se llevaron a cabo cálculos de las temperaturas máximas a una profundidad de 20 mm en el pavimento mediante tres modelos distintos: El modelo adoptado por el programa SHRP original, junto con aquellos

desarrollados mediante estudios realizados por especialistas del LTPP Bind (FHWA) en los años 1996 y 2004, constituyen las principales referencias. De todos ellos, el modelo LTPP Bind actualizado en 2004 proporciona la información más precisa y confiable. Dicho modelo considera variables como la persistencia de las temperaturas máximas diarias, la intensidad del viento y la radiación solar, integrando el modelo climático de la FHWA (ICM) para estimar las temperaturas máximas del pavimento. Por esta razón, se eligió este modelo para establecer el PG.

Este modelo se fundamenta en información recopilada de cerca de 800 estaciones meteorológicas, incluyendo registros horarios de temperatura, velocidad del viento y niveles de radiación solar en distintas regiones de los Estados Unidos.

$$T_{max} = 32.7 + 0.837 T_{max\ aire} - 0.0029 Lat^2 + z (\sigma^2 + \delta^2_{modelo})^{0.5}$$

Donde:

$T_{m\acute{a}x.}$: corresponde a la temperatura más alta estimada del pavimento a una profundidad de 20 mm (°C).

$T_{m\acute{a}x. \text{ aire}}$: representa la temperatura máxima registrada en el aire (°C).

Lat : indica la latitud geográfica donde se localiza el proyecto (°).

Z : es el valor obtenido de la distribución normal estándar que depende del nivel de confiabilidad seleccionado.

δ_{modelo} : error estándar asociado al modelo climático empleado, cuyo valor es de 2.1 °C.

σ : desviación estándar derivada de las observaciones climatológicas recopiladas.

Con la ecuación anterior se calculó la temperatura máxima del pavimento.

2.2.1.2 Cálculo de la temperatura Mínima del Pavimento. Se llevaron a cabo

cálculos de las temperaturas más bajas del suelo mediante cuatro modelos distintos. Entre los enfoques disponibles, destacan el modelo propuesto por el programa SHRP original, el cual asume que la temperatura mínima del pavimento equivale a la temperatura mínima del aire; el modelo desarrollado por el equipo canadiense del C-SHRP, y los modelos generados en el marco del LTPP Bind en los años 1996 y 2004. En este proyecto, se tuvieron en cuenta los datos del modelo LTPP del 2004, ya que ofrecen resultados más exactos. Además, en esta área en particular no se experimentan temperaturas bajas significativas, a diferencia de las zonas andinas del Perú. Por lo tanto, no se ha optado por un enfoque conservador en el cálculo de la temperatura.

$$T_{min} = -1.56 + 0.72 T_{air} - 0.004 Lat^2 + 6.26 \log_{10} (H + 25) - z (4.4 + 0.52 S_{air}^2)^{0.5}$$

Donde:

$T_{min\ aire}$: representa la temperatura mínima en la superficie del pavimento ($^{\circ}C$).

T_{air} : representa la temperatura ambiente ($^{\circ}C$).

Lat: corresponde a la latitud geográfica de la estación ($^{\circ}$).

H: indica la profundidad desde la superficie (mm).

S_{air} : se refiere a la desviación estándar de los datos recopilados.

Z: es el valor extraído de la tabla de distribución normal asociado al nivel de confianza seleccionado. A partir de esta expresión, se estimó la temperatura mínima del pavimento.

Es necesario hacer ciertas modificaciones al nivel de rendimiento alcanzado de acuerdo con las fórmulas presentadas previamente. La razón de esto es que al utilizar estas fórmulas se calcula el nivel de rendimiento, considerando únicamente las condiciones climáticas. No obstante, tal como se ha señalado previamente, el Nivel de Rendimiento (NR) también debe considerar el rendimiento en función de las cargas de tráfico (Loria-Salazar et al., 2024).

2.2.2 Estudio de condiciones climáticas del Distrito de Máncora

Es fundamental disponer de datos climáticos específicos del área del proyecto al seleccionar el tipo de pavimento más apropiado. Basándose en los registros diarios de temperatura proporcionados por las estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), se efectuaron los análisis pertinentes para determinar el grado de desempeño (PG) necesario para el ligante asfáltico.

Este proyecto tiene su inicio en la ciudad de Máncora hasta la ciudad de Tumbes. La estación meteorológica considerada para el cálculo del PG requerido fue la estación de Tumbes, la cual se consideró por ser la estación más cercana. se puede observar en la figura 6.

Tabla 1

Estación meteorológica utilizada para el cálculo del PG

CARRETERA	ESTACIÓN METEOROLÓGICA	LONGITUD	LATITUD	ALTURA (msnm)
MANCORA – PTE. BOCAPAN – TUMBES	TUMBES LA CRUZ	81° 02' 50" 80° 27' 05"	9° 15' 1" 3° 34' 00"	11 - 25

Nota: Fuente: Elaboración propia, 2024

Se realizará un estudio climático empleando la información oficial disponible en la plataforma digital del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), utilizando registros mensuales con una antigüedad de hasta 20 años correspondientes a la estación meteorológica ubicada en Tumbes.

En la Figura 5: En la localización de la estación meteorológica Tumbes (La Cruz) se presentan las temperaturas máximas y mínimas registradas a diario en dicha estación, destacando las altas temperaturas diurnas que alcanzan un promedio de 32.8 °C, propio del clima predominante en esta región peruana. Por lo tanto, el aglutinante asfáltico elegido debe

demostrar un rendimiento óptimo en estas circunstancias y resistir eficazmente las elevadas temperaturas, así como la frecuencia de cargas y el flujo de tráfico, con el propósito de prevenir dificultades de hundimiento. Es esencial considerar esta temperatura al momento de seleccionar el material, junto con la frecuencia de cargas y el volumen de tráfico, para evitar complicaciones de deformación duradera.

Figura 6

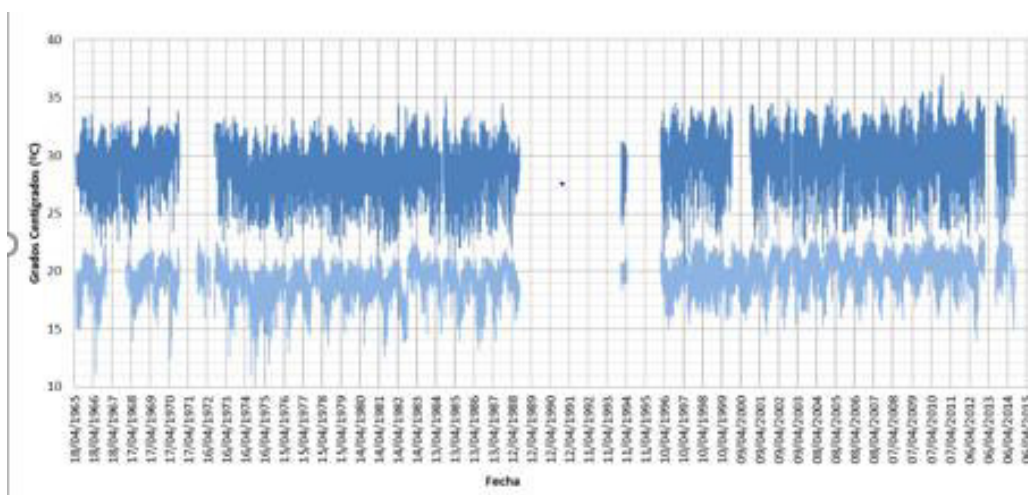
Ubicación de estación meteorológica, Tumbes



Nota. Fuente. Senamhi, 2024

Figura 7

Temperaturas en la estación meteorológica, Tumbes



Nota. Fuente. Senamhi, 2024

2.2.3 *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*

La Asociación Americana de funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte (AASHTO, por sus siglas en inglés) constituye una organización responsable de establecer normativas, emitir recomendaciones técnicas y validar procedimientos y manuales utilizados en la planificación, diseño y construcción de infraestructuras viales en Estados Unidos. Aunque lleva ese nombre, la organización no solo abarca las vías terrestres, sino también los medios de transporte aéreo, ferroviario, marítimo y el transporte colectivo.

La AASHTO está integrada principalmente por representantes de los Departamentos de Transporte de los cincuenta estados de Estados Unidos, además de Puerto Rico y el Distrito de Columbia. Asimismo, participan como observadores sin derecho a voto diversas entidades, entre las que se incluyen el Departamento de Transporte federal, gobiernos locales como condados y municipios, concesionarios de vías con peaje, la mayoría de las provincias de Canadá, autoridades viales de Hong Kong, el Ministerio de Infraestructura y Urbanismo de Turquía y la Asociación Nigeriana de Funcionarios de Transporte y Obras Públicas.

2.2.4 *Manual de Ensayos de Materiales – MTC*

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), como organismo rector en materia de transporte terrestre a nivel nacional, posee la competencia para formular y regular las disposiciones relacionadas con la gestión y supervisión de la red vial del país. En este contexto, la Dirección General de Caminos y Ferrocarriles actúa como la unidad encargada de normar y fiscalizar la administración de la infraestructura vial, incluyendo carreteras, puentes y vías férreas.

Dentro del marco normativo vigente, el Manual de Especificaciones Técnicas Generales para Construcción forma parte de los documentos técnicos incluidos en el Reglamento Nacional de Gestión de la Infraestructura Vial, aprobado mediante el D.S. N.º

034-2008-MTC. Este manual posee carácter obligatorio en todos los niveles de gobierno (nacional, regional y municipal) para las entidades responsables de la gestión de las infraestructuras viales.

El propósito fundamental del manual es estandarizar los criterios técnicos, parámetros, exigencias y metodologías aplicables a la ejecución de obras viales, promoviendo así una gestión eficiente y uniforme. Asimismo, su aplicación busca optimizar la calidad de las construcciones y minimizar posibles discrepancias contractuales durante el desarrollo de los proyectos. (Manual de Ensayos de Materiales, 2016, p. 11).

2.2.5 Manual de Carreteras Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (EG-2013)

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) es la entidad encargada de establecer y supervisar la normativa relacionada con la gestión de la red vial a nivel nacional. A través de la Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, se regulan las actividades vinculadas a la infraestructura de carreteras, puentes y ferrocarriles. En este marco, el Manual de Especificaciones Técnicas Generales para Construcción, parte del Reglamento Nacional de Administración de Infraestructura Vial aprobado por el D.S. N.º 034-2008-MTC, constituye un documento normativo de cumplimiento obligatorio en los tres niveles de gobierno. Su objetivo principal es estandarizar los criterios técnicos y procedimientos en la ejecución de obras viales, promoviendo la calidad y minimizando posibles controversias contractuales (Manual de Carreteras, 2013, p. 09).

2.2.6 Pavimento de Mezcla Asfáltica en Caliente

De acuerdo con lo establecido en las Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG-2013 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, el documento regula principalmente los lineamientos relacionados con la fabricación y colocación de una o más

capas de mezcla asfáltica en caliente (Manual del Ministerio de Transporte y Comunicaciones, EG-2013).

2.2.6.1 Requisitos de los agregados minerales gruesos. La verificación del cumplimiento de los criterios técnicos para los agregados gruesos se realizó conforme a lo estipulado en el documento EG-2013. Los resultados específicos se presentan en la Tabla 02.

Tabla 2

Requisitos para el agregado

Ensayos	Requerimiento		
	Altitud (msnm)		
	Norma	≤ 3.000	> 3.000
Durabilidad (al sulfato deMagnesio)	MTC E 209	18% máx.	15% máx.
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	40% máx.	35% máx.
Adherencia	MTC E 517	+95	+95
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35% min.	35% min.
Partículas chatas y alargadas	ASTM 4791	10% máx.	10% máx.
Caras fracturadas	MTC E 210	85/50	90/70
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0.5% máx.	0.5% máx.
Absorción (*)	MTC E 206	1.0% máx.	1.0% máx.

Nota: Fuente. Manual Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (EG-2013)

2.2.6.2 Requisitos para los agregados minerales finos. La evaluación de los agregados finos se realizó conforme a lo establecido en la normativa vigente (EG-2013). Los detalles correspondientes se consignan en la Tabla 03.

Tabla 3*Requisitos para el agregado fino*

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		Altitud (msnm)	
		≤3.000	> 3.000
Equivalente de Arena	MTC E 114	60	70.
Angularidad del agregado fino	MTC E 222	30	40
Azul de metileno	AASTHO TP 57	8 máx.	8 máx.
Índice de Plasticidad (malla N° 40)	MTC E 111	NP	NP
Durabilidad (al asfalto de Magnesio)	MTC E 209	-	18% máx.
Índice de durabilidad	MTC E 214	35 min.	35 min.
Índice de durabilidad (malla N°200)	MTC E 111	4 máx.	NP
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0.5% máx.	0.5% máx.
Absorción	MTC E 205	0.5% máx.	0.5% máx.

Nota: Fuente. Manual Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (EG-2013)

2.2.6.3 Relleno mineral o Filler. Existen varios materiales que se pueden emplear como relleno, como el cemento, la cal apagada, polvo de minerales, escoria en polvo, ceniza fina o loes. En este trabajo de investigación se analiza el filler como un componente obtenido de la máquina mezcladora de asfalto y agregados, que complementa la estructura granular.

2.2.6.4 Gradación de la mezcla asfáltica en caliente. Los requisitos de tamaño de partículas establecidos en la norma EG-2013 deben cumplir con las especificaciones indicadas en la Tabla 04. También influirá en su decisión el nivel de circulación y otros factores. También es posible utilizar diferentes niveles de gradación según lo establecido en la norma ASTM D 3515, que se detallan en la Tabla 04 del Instituto del Asfalto.

Tabla 4*Requisitos para usos granulométricos en MAC.*

Tamiz	Porcentaje que Pasa		
	MAC - 1	MAC - 2	MAC - 3
25,0 mm (1")	100		
19,0 mm (3/4")	80 - 100	100	
12,5 mm (1/2")	67 - 85	80 - 100	
9,5 mm (3/8")	60 - 77	70 - 88	100
4,75 mm (N° 4)	43 - 54	51 - 68	65 - 87
2,00 mm (N° 10)	29 - 45	38 - 52	43 - 61
425 µm (N° 40)	14 - 25	17 - 28	16 - 29
180 µm (N° 80)	8.-17	8.-17	9. - 19
75 µm (N° 200)	4.-8	4.-8	5. - 10

Nota: Fuente. Manual Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (EG-2013)

Tabla 5*Requisitos para gradación de mezclas.*

	Mezcla Cerrada								
	Tamaño máximo nominal del agregado								
	2 in	1 1/2 in	1 in	3/4 in	1/2 in	3/8 in	N° 4	N° 8	N° 16
Abertura de malla	(50 mm)	(37,5 mm)	(25,0 mm)	(19,0 mm)	(12,5 mm)	(9,5 mm)	(4,75 mm)	(2,36 mm)	(1,18 mm)
2 1/2" (63mm)	100								
	90 -								
2" (50mm)	100	100							
		90 -							
1 1/2" (37,5mm)		100	100						
	60 -		90 -						
1" (25,0mm)	80		100	100					

				90 -				
¾" (19.0mm)		56 - 80		100	100			
	35 -				90 -			
½" (12.5mm)	65		56 - 80		100	100		
						90 -		
3/8" (9.5mm)		...	56 - 80	...	100	100		
						80 -		
Nº4(4.75mm)	17- 47	23 - 53	29 - 59	35 - 65	44 - 74	55 - 85	100	100
	10. -						65 -	
Nº8(2.36mm)	36	15 - 41	19 - 45	23 - 49	28 - 58	32 - 67	100	95-100
Nº16(1.18mm)							40 - 80	85-100
Nº30(600µm)							35 - 65	70-95
Nº50(300µm)	3. - 15	4. - 16	5. - 17	5. - 19	5. - 21	7. - 23	7. - 40	45-75
Nº100(150µm)							3. - 20	20-40
Nº200 (75µm)	0 - 5	0 - 6	1. - 7	2. - 8	2. - 10	2. - 10	2. - 10	9-20

Nota: Fuente. Manual Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (EG-2013)

2.2.6.5 Mejoradores de adherencia. Se refieren a artículos empleados en las combinaciones de asfalto con el propósito de aumentar la unión entre el asfalto y los materiales agregados, según tabla 06.

Tabla 6

Efectividad de los aditivos adherentes

Ensayos	Norma	Requerimientos
Resistencia conservada en la prueba de tracción indirecta	AASTHO T 283	80 min.

Nota: Fuente. Manual Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (EG-2013)

2.2.6.6 Requerimiento de cemento asfáltico modificado con polímeros. Se trata de un aglutinante bituminoso sólido al que se incorpora un polímero con el fin de potenciar sus características viscoelásticas, empleado en el proceso de producción, como se verifica en la Tabla 07, 08 y 09.

Tabla 7*Especificaciones de cemento asfáltico modificado con polímeros Tipo I*

Ensayos		TIPO I							
		I-A		I-B		I-C		I-D	
		Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Penetración, 25°C. 100g. 5s, dmm	MET E-304	100	150	75	100	50	75	40	75
Viscosidad absoluta 60°C, poise	MET E-308	1,250		2,500		5,000		5,000	
Viscosidad. 135°C, cSt	MET E-310		3,000		3,000		3,000		3,000
Punto de inflamación. COC. °C	MET E-303	232		232		232		232	
Solubilidad en tricloroetileno; %	MET E-302	99		99		99		99	
Separación, diferencia entre punto de ablandamiento (anillo y bola) de porción superior e inferior; °C	MET E-307		2,2		2,2		2,2		2,2
	MET E-319								
Recuperación elástica, 25°C; %	ASTM D-6084	60		60		60		60	
Recuperación elástica. 5°C; %	ASTM D-6084	50				--		--	
Punto de Ablandamiento (anillo y bola). %	MET E-307	45		50		60		60	
Pruebas en el residuo de película fina y rotatoria (1)									
Recuperación elástica 25°C, 10 cm de elongación; %	ASTM D-6084	60		60		60		60	
Penetración. 4°C. 200g. 60s; dmm	MET E-304	20		15		13		10	
Separación, diferencia entre punto de ablandamiento (anillo y bola) de porción superior e inferior; °C	MET E-307		≤10		≤10		≤10		≤10

Nota: Fuente. Manual Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (EG-2013)

Tabla 8*Especificaciones de cemento asfáltico modificado con polímeros Tipo II*

Ensayos		TIPO II							
		II-A		II-B		II-C		II-D	
		Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Penetración, 25°C. 100g. 5s, dmm	MET E-304	100		70		85		80	
Viscosidad absoluta 60°C, poise	MET E-308	800		1.600		800		1.600	
Viscosidad. 135°C, cSt	MET E-310	300		300		300		300	
Ductilidad. 4°C. 5crn/min; cm	MET E-306	50		50		50		50	
Punto de inflamación. COC. °C	MET E-	232		232		232		232	

Recuperación elástica, 25°C; %	303 ASTM D-6084	50	50	50	50
Separación, diferencia entre punto de ablandamiento (anillo y bola) de porción superior e inferior; °C	MET E-307 MET E-319	60	60	60	60
Punto de Ablandamiento (anillo y bola). %	MET E-307	45	50	50	50
Pruebas en el residuo de película fina y rotatoria (1)					
Ductilidad. 4°C. 5cm/min; cm	MET E-306	25	25	10	10
Viscosidad, 60°C. 1 s-\ poise	MET E-308	4.000	8.000	4.000	8.000

Nota: Fuente. Manual Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (EG-2013)

Tabla 9

Especificaciones de cemento asfáltico modificado con polímeros Tipo IV

		TIPO IV							
		IV-A		IV-B		IV-C		IV-D	
Ensayos		Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Penetración, 25°C. 100g. 5s, dmm	MET E-304	100	150	75	100	50	75	40	75
Viscosidad absoluta 60°C, poise	MET E-308	1,250		4,000		2,500		6,000	
Viscosidad. 135°C, cSt	MET E-310		3,000		3,000		3,000		3,000
Punto de inflamación. COC. °C	MET E-303	232		232		232		232	
Solubilidad en tricloroetileno; %	MET E-302	99		99		99		99	
Separación, diferencia entre punto de ablandamiento (anillo y bola) de porción superior e inferior; °C	MET E-307 MET E-319		2,2		2,2		2,2		2,2
Recuperación elástica, 25°C; %	ASTM D-6084	60		60		60		60	
Recuperación elástica. 5°C; %	ASTM D-6084	50		--		--		--	
Punto de Ablandamiento (anillo y bola). %	MET E-307	50		50		50		50	
Pruebas en el residuo de película fina y rotatoria (1)									
Recuperación elástica 25°C, 10 cm de elongación; %	ASTM D-6084	60		70		60		70	
Penetración. 4°C. 200g. 60s; dmm	MET E-304	20		20		15		15	
Separación, diferencia entre punto de ablandamiento (anillo y bola) de porción superior e inferior; °C	MET E-307	≤10		≤10		≤10		≤10	

Nota: Fuente. Manual Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (EG-2013)

2.2.6.7 Requerimiento para mezcla asfáltica en caliente. Los estándares de calidad se ajustarán a lo establecido en la normativa EG-2013, reflejada en las Tablas 08, 09 y 10, dependiendo del tipo de mezcla generada en consonancia con el plan de obra.

Tabla 10

Requisitos para mezclas de concreto bituminoso

Parámetro de Diseño	Clase de Mezcla		
	A	B	C
Marshall MTC E 504			
1. Compactación, número de golpes por lado	75	50	35
2. Estabilidad (mínimo)	8,15 kn	5,44 kn	4,53 kn
3. Flujo 0,01” (0,25 mm)	8-14	8-16	8-20
4. Porcentaje de vacíos con aire (MTC E 505)	3-5	3-5	3-5
5. Vacíos en el agregado mineral	Ver Tabla 11		
Inmersión – Compresión (MTC E 518)			
1. Resistencia a la compresión Mpa mín.	2.1	2.1	1
2. Resistencia retenida % (mín.)	75	75	7.45
Relación Polvo – Asfalto	0.6-1.3	0.6-1.3	0.6-1.3
Relación Estabilidad/flujo (kg/cm)	1.700-4.000		
Resistencia conservada en la prueba de tracción indirecta AASHTO T 283	80 min.		

Nota: Fuente. Manual Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (EG-2013)

Tabla 11

Vacíos mínimos en el agregado mineral (VMA)

Tamiz	Vacíos mínimos en agregados mineral %	
	Marshall	Superpave

2,36 mm (N.º 8)	21	-
4,75 mm (N.º 4)	18	-
9,50 mm (3/8")	16	15
12,5 mm (1/2")	15	14
19,0 mm (3/4")	14	13
25,0 mm (1")	13	12
37,5 mm (1 1/2")	12	11
50,0 mm (2")	11,5	10,5

Nota: Fuente. Manual Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (EG-2013)

Tabla 12

Requerimiento para Adherencia

Ensayos	Requerimiento		
	Norma	≤ 3.000	> 3.000(*)
Adherencia (Agregado grueso)	MTC E 517	+95	-
Adherencia (Agregado fino)	MTC E 220	4 min. (**)	-
Adherencia (mezcla)	MTC E 521	-	+95
Resistencia conservada en laprueba de tracción indirecta	AASHTO T283	-	80 min.

Nota: Fuente. Manual Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (EG-2013)

Tabla 13

Vacíos mínimos en el agregado mineral

	Vacíos mínimos en agregado
	mineral %

Tamiz	Marshall
2,36 mm (N° 8)	21
4,75 mm (N° 4)	18
9,50 mm (3/8")	16
12,5 mm (1/2")	15
19,0 mm (3/4")	14
25,0 mm (1")	13
37,5 mm (1 1/2")	12
50,0 mm (2")	11,5

Nota: Fuente. Manual Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (EG-2013)

2.2.7 Método Marshall

Fue Bruce Marshall en el Departamento de Carreteras del Estado de Mississippi en los Estados Unidos quien ideó el enfoque para diseñar mezclas asfálticas. El ensayo actual se originó de una investigación emprendida por el cuerpo de ingenieros del ejército estadounidense en 1943, con el propósito de desarrollar un sistema para diseñar y supervisar las pistas de aterrizaje de aeropuertos durante la Segunda Guerra Mundial. La decisión del cuerpo de ingenieros de incorporar el Método Marshall se basó en la conveniencia de su equipo, el cual era sencillo de usar, portátil y permitía una rápida aplicación en el lugar de trabajo. Se realizaron diversas evaluaciones mediante simulación de tráfico con el propósito de analizar el comportamiento de las distintas mezclas y determinar la energía de compactación necesaria para obtener muestras con una densidad comparable a la alcanzada en condiciones reales de obra.

El propósito del método de diseño Marshall es determinar el contenido óptimo de ligante asfáltico para una combinación específica de agregados. La prueba mecánica consiste en romper especímenes cilíndricos con un diámetro de 101,6 mm y una altura de 63,5 mm. Las probetas se preparan conforme a las especificaciones del Anexo I y se compactan utilizando un martillo de peso y altura de caída normalizados. Posteriormente, se calientan hasta 60 °C y se ensayan en la prensa Marshall, la cual aplica una carga vertical mediante una abrazadera lateral a una velocidad de deformación constante de 50,8 mm/min. Este procedimiento permite evaluar la resistencia y la capacidad de deformación de la mezcla, estableciendo los valores óptimos de densidad y vacíos que deben cumplirse durante la construcción del pavimento.

Cabe destacar que este método es ampliamente reconocido y utilizado tanto para cuantificar mezclas bituminosas como para controlar su calidad en planta, mediante la verificación del cumplimiento de los parámetros de diseño en las muestras extraídas. En el contexto español, se aplica principalmente en la formulación de mezclas bituminosas con distintas densidades (densas, semidensas y gruesas). No obstante, su aplicación resulta limitada en mezclas abiertas, ya que no presenta la sensibilidad necesaria para evaluar el efecto del aglutinante sobre el comportamiento de la mezcla. No es apto para describir combinaciones con alto coeficiente de fricción interna y una consistencia de masilla baja (Rojas, 2024).

2.2.8 Método de Diseño Superpave

En 1987, el Congreso de los Estados Unidos impulsó el desarrollo del Programa de Investigación de Carreteras Estratégicas (SHRP), destinando un presupuesto de 150 millones de dólares con el objetivo de investigar alternativas que optimicen el desempeño y la durabilidad de las vías, contribuyendo así a mejorar la seguridad vial general. Como parte de esta iniciativa, se diseñó un sistema innovador para la caracterización de materiales bituminosos, lo que dio lugar al desarrollo del sistema Superpave (Superior Performing Asphalt Pavement). Esta metodología integra criterios técnicos para la selección del ligante asfáltico y

los agregados, orientados al diseño de mezclas asfálticas de alto rendimiento. Además, permite predecir el comportamiento del pavimento a través del análisis detallado de cada componente de la mezcla, evaluando tanto sus propiedades individuales como su desempeño conjunto (Quispe, 2022).

2.2.9 Ensayo de Resistencia al Ahuellamiento (Rueda de Hamburgo)

Este informe se elaboró siguiendo los lineamientos establecidos en la norma AASHTO T 324, la cual se emplea para analizar la resistencia de las mezclas asfálticas frente a la deformación permanente. El ahuellamiento representa una de las manifestaciones más comunes de deterioro en las capas superficiales del pavimento, ocasionado por la acumulación de deformaciones plásticas verticales debido al tránsito repetido. Estas deformaciones generan depresiones longitudinales en la calzada, alineadas con el paso de las ruedas, afectando no solo el desempeño funcional del pavimento, sino también comprometiendo su integridad estructural. Además, dichas situaciones pueden provocar problemas tanto en la estructura como en el funcionamiento del pavimento. No obstante, diversos estudios, como los realizados por Sousa et al. (1994) y Chen et al. (2003), han señalado que la capa asfáltica es particularmente vulnerable al desarrollo de ahuellamientos. Para evaluar la resistencia del pavimento frente a la deformación inducida por el tráfico y los efectos del agua, se aplican ensayos de laboratorio, siendo uno de los más reconocidos el ensayo de la Rueda de Hamburgo (AASHTO T 324). Este método permite determinar la capacidad de las mezclas asfálticas en caliente para resistir tanto la deformación permanente como el deterioro por humedad. El procedimiento consiste en someter probetas cilíndricas, de aproximadamente 150 mm de diámetro y 62 mm de altura, previamente compactadas mediante el compactador giratorio Superpave, a una carga repetida de una rueda dentro de un baño de agua controlado entre 40 °C y 50 °C. Como resultado, se obtiene la tasa de deformación de la mezcla, determinada a partir de la profundidad de la huella y del número de pasadas hasta que ocurre la falla, siendo el criterio de aceptación una

profundidad máxima de 12.5 mm tras 20 000 ciclos de carga, conforme a la norma T 324 (Quispe, 2022).

2.2.10 Ensayo de Resistencia a la Flexión Elástica (Modulo Resiliente)

Los elementos que conforman las superficies de las calles experimentan fuerzas en movimiento de diferentes intensidades que son causadas por los vehículos que circulan por ellas. Con el propósito de analizar el comportamiento de los materiales empleados en infraestructuras viales ante cargas cíclicas, así como su respuesta elástica y no lineal, se han desarrollado múltiples investigaciones experimentales a nivel internacional. Estos estudios han incluido tanto ensayos en modelos a escala real como pruebas de laboratorio sobre especímenes, permitiendo obtener información relevante sobre la relación entre la carga aplicada y la deformación resultante en los materiales. Las deformaciones resilientes, que se recuperan rápidamente, se conocen como elásticas, mientras que se clasifican como plásticas aquellas que permanecen en la superficie una vez que cesa la presión.

Durante el proceso de carga en movimiento, se produce una acumulación de deformación permanente. A lo largo de los ciclos intermedios, la deformación permanente tiende a disminuir progresivamente, hasta hacerse prácticamente imperceptible en las etapas finales. Cuando la muestra alcanza un estado en el cual la totalidad de la deformación se recupera, se dice que presenta un comportamiento resiliente. De este fenómeno se deriva el concepto de módulo resiliente, entendido como la respuesta del material bajo cargas repetidas de esfuerzo desviador en condiciones de compresión triaxial, durante las cuales se produce una recuperación de la deformación axial. Esta propiedad está inherentemente vinculada a procesos de carga cíclica. Investigaciones previas han demostrado que el módulo resiliente no es una característica constante, sino que depende de múltiples variables, como la frecuencia de aplicación de la carga, la tixotropía del material, la magnitud del esfuerzo desviador, el método de compactación y las condiciones existentes durante dicho proceso. En este sentido, la

metodología de diseño de pavimentos adoptada por AASHTO reconoce al módulo resiliente como una propiedad clave para la caracterización mecánica de los materiales que conforman la estructura vial. Por eso, el profesional a cargo del diseño, la edificación y el mantenimiento de dichas estructuras debe contar con los conocimientos fundamentales sobre el significado del parámetro módulo resiliente, el procedimiento de laboratorio para su obtención y los criterios a tener en cuenta al elegir el valor apropiado para aplicarlo en un enfoque de diseño específico (Universidad Politécnica de Catalunya, 2024)

2.2.11 Ensayo de Resistencia a la Elasticidad (Modulo Dinámico)

El módulo dinámico representa el valor absoluto del módulo complejo, siendo uno de los parámetros más empleados para caracterizar el comportamiento elástico de materiales viscoelásticos como el asfalto, conforme a lo establecido en la norma AASHTO T-342 (2014). Este módulo refleja la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación generada, y su magnitud depende de la temperatura y del tiempo de aplicación de la carga. Las briquetas empleadas para este ensayo fueron elaboradas utilizando los mismos materiales y condiciones que las del método Marshall, presentando una forma cilíndrica con un diámetro de 10 cm. Las pruebas se realizaron siguiendo los lineamientos de la AASHTO T-342, aplicando cargas a temperaturas de 5 °C, 25 °C y 40 °C, y a frecuencias de 1 Hz, 4 Hz, 10 Hz y 16 Hz.

A temperaturas elevadas, el asfalto presenta una mayor deformación bajo carga, lo cual reduce su módulo dinámico; en contraste, a temperaturas más bajas, la capacidad de deformación disminuye y el módulo aumenta. Asimismo, la frecuencia de carga también influye en este parámetro: a mayores frecuencias, la aplicación de carga es más rápida y las deformaciones son menores, resultando en un módulo más alto. A frecuencias bajas, los tiempos de carga prolongados permiten mayores deformaciones, lo que reduce el módulo dinámico. Esta propiedad, por tanto, es útil para identificar el comportamiento mecánico del asfalto, diferenciando entre una respuesta predominantemente elástica (módulo alto, baja

deformación) y una de tipo viscoso (módulo bajo, alta deformación).

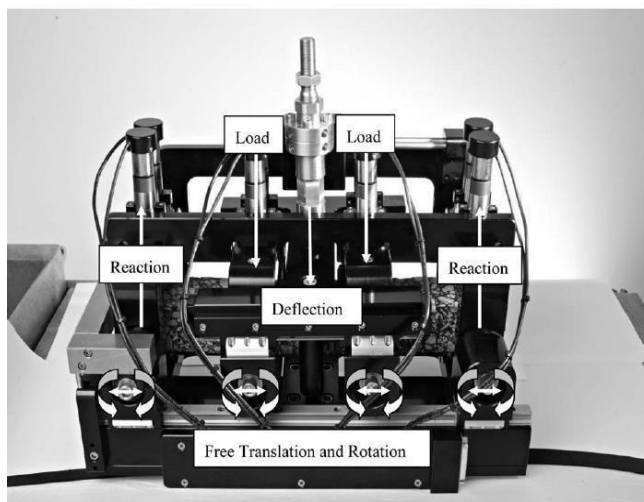
Durante el ensayo, se registran datos como el tiempo [s], el desplazamiento [mm], la fuerza [kg-f] y las lecturas del extensómetro [mm]. Para garantizar la calidad de los resultados, se consideran únicamente los últimos 100 datos registrados y los 100 anteriores, descartándose el resto para evitar sesgos derivados de la acomodación de la muestra o posibles errores al final de la prueba (Santa Cruz, 2023).

2.2.12 Ensayo de Resistencia a la Fatiga (Viga Cuatro Puntos)

Este procedimiento, regulado por la norma AASHTO T231-14, es uno de los más empleados para analizar el comportamiento de mezclas asfálticas frente a cargas repetitivas de fatiga. Consiste en someter probetas prismáticas rectangulares esbeltas (380 ± 6 mm de largo, 50 ± 2 mm de alto y 63 ± 2 mm de ancho) a flexión en un sistema de cuatro puntos, con las abrazaderas interiores y exteriores dispuestas de forma simétrica. Las cargas se aplican verticalmente a través de los puntos internos, mientras que los extremos permiten movimiento libre de rotación y traslación.

Figura 8

Equipo de ensayo a fatiga a flexión en 04 puntos

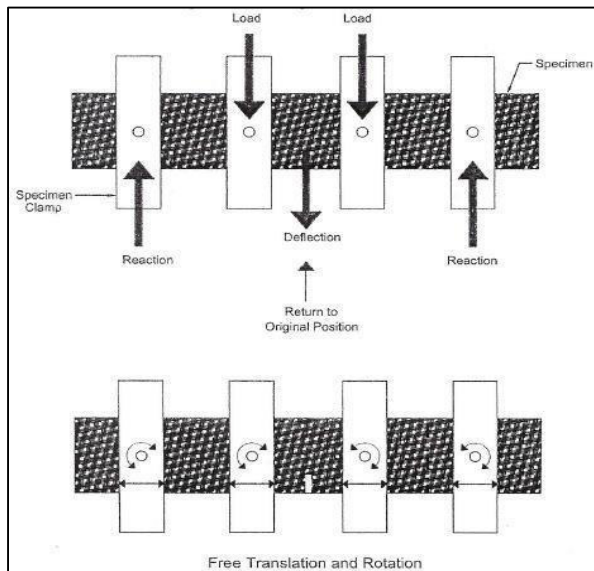


Nota. Fuente. AASHTO, 2011

Durante la prueba, se mide la fuerza necesaria para generar una deflexión específica, permitiendo calcular el módulo de rigidez y el ángulo de fase en cada ciclo. Estos parámetros son esenciales para evaluar la resistencia a la fatiga de la mezcla. La prueba se desarrolla normalmente a una temperatura controlada de 20 ± 0.5 °C, con frecuencias de carga sinusoidal entre 5 y 10 Hz. Finalmente, se obtiene el módulo de rigidez inicial al ciclo 50, y el ensayo se extiende hasta que dicho módulo se reduzca a la mitad o hasta que se produzca la rotura de la muestra (ver Figura 9).

Figura 9

Principios básicos del ensayo a flexión en viga de cuatro puntos



Nota. Fuente. AASHTO, 2011

III. MÉTODO

La presente investigación se enmarca como un estudio de tipo documental o bibliográfico, ya que busca recopilar información relevante y fundamentada proveniente de expertos y especialistas, con el propósito de analizar el comportamiento de mezclas asfálticas modificadas con polímeros elastoméricos y aditivos adherentes, es bibliográfica porque procura recopilar, conseguir, escoger, obtención de resultando acerca de la adición de polímeros elastoméricos con aditivo adherente, para evaluar el desempeño de las propiedades físico-mecánicas de la mezcla asfáltica, siendo este más resistente y alargue la vida útil en la carpeta asfáltica de una carretera y también se apoya en un marco teórico y técnico fundamentado en criterios y metodologías recogidos de diversos artículos científicos.

Se recurre a fuentes documentales como artículos científicos, investigaciones previas, tesis académicas y revistas especializadas, con el fin de identificar los ensayos aplicados a mezclas bituminosas modificadas con polímeros elastoméricos y aditivos adherentes.

3.1 Tipo de investigación

El tipo de la investigación es: Descriptiva – Correlacional – Explicativa. En un tipo de investigación descriptivo en la que se selecciona una serie de razones, conceptos o variables y que se evalúa cada una de ellas independientemente de las otras, Con el propósito de describir las características, este tipo de estudios se enfoca en identificar las propiedades clave de personas, grupos u otros fenómenos. Es de tipo correlacional, ya que su objetivo es medir el grado de relación entre las variables dentro de una misma muestra. Además, es explicativo porque está estructurado y brinda información que permite entender el fenómeno en estudio.

3.2 Población y muestral

3.2.1 Población

La población considerada en esta investigación está constituida por briquetas y

especímenes elaborados a partir de mezclas asfálticas que incorporan diferentes porcentajes de asfaltos modificados con polímeros y aditivos de adherencia, suministrados por la empresa BITUPER S.A.C.

Los ensayos de laboratorio se llevarán a cabo utilizando briquetas u otros modelos de mezcla asfáltica modificada con polímeros elastoméricos y un aditivo adherente. Una vez determinado el contenido óptimo del ligante modificado, se fabricarán especímenes para evaluar el desempeño mediante pruebas de ahuellamiento, flexión elástica, elasticidad y resistencia a la fatiga en viga. Se emplearán proporciones de adición de polímero del 2.0 %, 2.5 % y 3.0 %, con el objetivo de identificar la dosificación que proporcione la mejora más significativa en las propiedades de la mezcla, evaluadas a través del ensayo de daño por humedad (método Lottman).

3.2.2 Muestra

La muestra proviene de un diseño experimental basado en la selección por conveniencia, una técnica comúnmente utilizada. Este método consiste en elegir una muestra de la población que esté disponible, sin seguir un criterio estadístico específico. Es decir, los individuos incluidos en la investigación son seleccionados por su accesibilidad, no por un proceso aleatorio o representativo. Este tipo de muestreo, conocido como por conveniencia, ofrece ventajas operativas al ser más fácil de llevar a cabo y menos costoso. Sin embargo, tiene la desventaja de no permitir hacer generalizaciones rigurosas sobre la población.

En el presente estudio, se ha optado por un muestreo por conveniencia, conforme a los distintos ensayos previstos. Esta elección se sustenta en lo estipulado por el Manual de Ensayo de Materiales (2016) y el Manual de Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG-2013, ambos aprobados por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Las muestras consideradas son las siguientes:

Tabla 14

Numero de muestras para determinar el contenido óptimo de asfalto y polímeros elastoméricos para el ensayo Marshall – MTE E 504.

Mezcla asfáltica % Polímeros	Porcentaje de asfalto Optimo (%)			
	4.5	5	5.5	6
2.5%	3	3	3	3
3.0%	3	3	3	3
3.5%	3	3	3	3
Total	9	9	9	9

Fuente: Elaboración Propia y el Laboratorio BITUPER S.A.C

Tabla 15

Numero de muestras para el ensayo de Rueda de Hamburgo de la mezcla asfáltica modificado con polímeros elastoméricos y aditivo adherente – AASHTO T 324

Mezcla asfáltica % Polímeros	Porcentaje de asfalto Optimo (%)			
	4.5	5	5.5	6
3.0%	-	-	3	-
Total			3	

Nota. Fuente: Elaboración Propia y el Laboratorio BITUPER S.A.C

Tabla 16

Numero de muestras para el ensayo de Modulo Resiliente de la mezcla asfáltica modificado con polímeros elastoméricos y aditivo adherente – AASHTO TP 31

Porcentaje de asfalto Optimo (%)

Mezcla asfáltica % Polímeros	4.5	5	5.5	6
3.0%	-	-	3	-
Total			3	

Nota. Fuente: Elaboración Propia y el Laboratorio BITUPER S.A.C

Tabla 17

Numero de muestras para el ensayo de Modulo Dinámico de la mezcla asfáltica modificado con polímeros elastoméricos y aditivo adherente – AASHTO T 342

	Porcentaje de asfalto Optimo (%)			
Mezcla asfáltica % Polímeros	4.5	5	5.5	6
3.0%	-	-	3	-
Total			3	

Nota. Fuente: Elaboración Propia y el Laboratorio BITUPER S.A.C

Tabla 18

Numero de muestras para el ensayo a la resistencia a la fatiga de la mezcla asfáltica modificado con polímeros elastoméricos y aditivo adherente – AASHTO T 321

	Porcentaje de asfalto Optimo (%)			
Mezcla asfáltica % Polímeros	4.5	5	5.5	6
3.0%	-	-	3	-
Total			3	

Nota. Fuente: Elaboración Propia y el Laboratorio BITUPER S.A.C

3.3 Operacionalización de variables

Tabla 19

Operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Indicadores	Índices	Métrica	Instrumento	Herramienta
Variable Independiente: Polímeros y Aditivo de Adherencia.	Los polímeros son sustancias de cadenas largas de moléculas repetitivas, que mejoran la elasticidad, flexibilidad y resistencia a la fatiga del asfalto formada por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas llamados monómeros (compuestos químicos con moléculas simples). Los aditivos de Adherencia son agentes activos mejoradores que se mezclan con el asfalto lo cuales mejoran su resistencia y contribuyen a la durabilidad de una mezcla asfáltica	Los Polímeros y el Aditivo de adherencia es relacionando directamente con el asfalto modificado para mejorar el desempeño de las propiedades físico-mecánicas de la mezcla asfáltica adherencia mejorando su rendimiento y alargar su vida útil.	✓ Porcentaje de Asfalto modificado con polímeros elastoméricos y Aditivo de Adherente.	✓ % de dosificación de Asfalto modificado ($\geq 5.5\%$) ✓ % de dosificación de aditivo de Adherencia ($\geq 0.5\%$)	✓ %	Formatos	MANUAL EG-2013 DEL MTC y AASHTO
Variable Dependiente: Propiedades físico-mecánicas des Mezclas Asfálticas Modificadas	EL deterioro prematuro del pavimento se debe al comportamiento de los materiales que lo conforman, los diferentes tipos de clima y el número de repeticiones de cargas de tráfico de vehículos, Además las características o cualidades básicas de la resistencia de la mezcla asfáltica modificadas con polímeros elastoméricos y aditivos de adherencia, lo cual se debe corroborar a través de los ensayos por desempeño Superpave, que cumple que los requerimientos asfáltico modificado con polímeros y aditivo de adherencia, que satisfaga los parámetros de elasticidad, fatiga y ahuellamiento.	Las propiedades físico-mecánicas de mezcla asfáltica modificadas con polímeros y aditivo de adherencia, es un área de investigación, especialmente en la construcción de pavimentos flexibles. Esta evaluación permite mejorar la resistencia y durabilidad de una asfáltica.	✓ Porcentaje de ahuellamiento permanente ✓ Deformación y flexión elásticas. ✓ Porcentaje de Elasticidad ✓ Porcentaje de rigidez a la flexión	✓ % de ahuellamiento ✓ Deformación ✓ MPa ✓ % rigidez	✓ % ✓ % ✓ MPa ✓ %	Formatos Formatos Formatos Formatos	ASHTO T324 AASHTO TP -31 ASHTO T342 ASHTO 321-14

3.4 Instrumentos y técnicas

3.4.1 Instrumentos

La obtención de datos se llevará a cabo mediante el uso de fichas técnicas y/o formatos específicos para la recolección de información primaria, conforme a lo establecido en el Manual de Ensayo de Materiales – 2016 del MTC y las directrices de AASHTO. Asimismo, se utilizarán los formularios estandarizados por normativas tanto nacionales como internacionales, en los cuales se consignarán de manera sistemática los resultados obtenidos en los distintos ensayos destinados a evaluar el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas.

3.4.2 Técnicas

La presente investigación aplica la técnica de observación, considerando la ejecución previa de los ensayos de caracterización tanto de los agregados como del cemento asfáltico modificado con polímeros elastoméricos, conforme a lo establecido en el *Manual de Ensayo de Materiales – 2016*. El proceso inicia con el diseño de la mezcla asfáltica modificada, incorporando polímeros elastoméricos y un aditivo adherente. Para ello, se realizan inicialmente los ensayos de inmersión-compresión con el fin de determinar las condiciones óptimas de temperatura y tiempo de digestión de la mezcla. Posteriormente, se aplica la metodología del ensayo Marshall para obtener los parámetros de comportamiento de la mezcla (estabilidad, fluidez, densidad, contenido de vacíos en la mezcla y vacíos en el agregado mineral), a partir de los cuales se define el contenido óptimo de asfalto y la proporción más adecuada del modificante polimérico junto al aditivo adherente. Una vez obtenidas las condiciones óptimas de diseño, se procede con la evaluación del comportamiento mecánico mediante ensayos de caracterización y desempeño, tales como el ensayo de la Rueda de Hamburgo, el ensayo de módulo resiliente, módulo dinámico y flexión a cuatro puntos. Estos ensayos permitirán observar los efectos producidos por las distintas proporciones de asfalto y

polímero con aditivo, registrando los resultados para su posterior análisis.

3.5 Procedimientos

La presente investigación toma como referencia estudios previos tanto a nivel nacional como internacional para establecer los procedimientos que permitan determinar el contenido óptimo de asfalto en mezclas modificadas con polímeros elastoméricos y aditivos de adherencia. Este contenido debe cumplir con los requisitos establecidos por parámetros físico-mecánicos (estabilidad y flujo) y dinámicos (elasticidad, resistencia a la fatiga y deformación permanente). Para el desarrollo del ensayo Marshall, se prepararán briquetas con tres niveles de contenido de ligante (4.5 %, 5.0 % y 5.5 %), a fin de identificar la proporción que maximice el desempeño físico-mecánico mediante los indicadores técnicos del método Marshall, tales como estabilidad, fluidez, densidad, vacíos totales de la mezcla y vacíos del agregado mineral. En el caso del ensayo de la Rueda de Hamburgo, se evaluará el comportamiento de las mezclas con diferentes proporciones de asfalto modificado, teniendo como criterio el límite de deformación de 12,00 mm de profundidad de huella. Paralelamente, el ensayo de módulo resiliente permitirá analizar la deformación elástica recuperable de la mezcla frente a cargas repetidas a temperatura constante. Este parámetro es esencial tanto en el diseño empírico de pavimentos propuesto por la Guía AASHTO 93 como en el enfoque mecanístico-empírico contemplado en la Guía 2022, al representar una de las propiedades fundamentales requeridas para el diseño estructural de pavimentos. Además, para el ensayo del Módulo Dinámico se ensayan tres especímenes de ensayo dos veces para cada condición de temperatura y frecuencia. Se efectúan los ensayos en el mismo orden que el ensayo de briquetas de mezcla asfáltica, para estos especímenes se llevan a la temperatura específica antes de cada ensayo y se observa tanto el esfuerzo debido a la carga como la deformación axial durante el ensayo. Este aumentara la velocidad del registrados de gráficos de tal manera que el primer ciclo cubra de 10 a 20mm del papel del grafico para cinco a diez repeticiones y este proceso se completa

dentro de los 02 minutos contados a partir del tiempo cuando fueron removidos los especímenes de la cámara con control de temperatura. Finalmente, el ensayo de resistencia a la fatiga se llevará a cabo considerando el contenido óptimo de asfalto modificado con polímeros elastoméricos y aditivo adherente, en los porcentajes previamente establecidos. Los resultados se evaluarán a partir de la rigidez inicial obtenida en el ciclo número 50, bajo la aplicación de una deformación controlada de 500 microstrain. El criterio de finalización del ensayo corresponde al punto en el cual la rigidez del material se reduce al 50 % de su valor inicial. Adicionalmente, se registrará el número total de ciclos soportados hasta alcanzar dicha condición límite.

3.6 Análisis de datos

Los resultados de cada ensayo permiten recopilar datos que serán incluidos en el programa estadístico (Excel, Minitab, etc.), para su análisis y organización en tablas de precisión porcentual y de barras, según las estadísticas específicas y por las normas nacionales e internacionales. Para llevar a cabo el análisis estadístico de los valores obtenidos, se emplearon los siguientes programas:

- Microsoft Office – Excel, para la presentación de datos y Gráficos.
- Reporte de software (Datos de Crecimiento de resistencia de mezcla asfáltica modificadas, por porcentajes de asfalto con polímeros y aditivo de Adherencia.)
- Tablas Personalizadas de contingencia y doble entrada.
- Gráficos de barras, graficas tipo pastel entre otros.

Los resultados presentados estarán para los siguientes indicadores:

- Porcentaje de Ahuellamiento permanente.
- Deformación y Flexión elástica.
- Porcentaje de Elasticidad.

- Porcentaje de Rigidez a la flexión.

IV. RESULTADOS

4.1 Materiales para la Mezcla Asfáltica Modificada.

Los agregados empleados en el diseño de la mezcla asfáltica modificada, tanto los finos como los gruesos, provienen del material procesado en la cantera Fernández, situada en el kilómetro 149+110 del lado derecho (L.D.). Ruta PE-1N, lo cual el acceso tiene una longitud de 18.00Km, en afirmado, este acceso en afirmado se encuentra en condiciones buenas de transitabilidad.

Tabla 20

Ubicación y acceso desde la Ruta PE-1N a la Cantera Fernández

Ubicación (Grados Decimales)	Latitud	4° 10' 25.31"
	Longitud	80° 57' 17.81"
Acceso desde Corredor Vial	Trocha Carrozable	18.00 (Km)

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

Figura 10

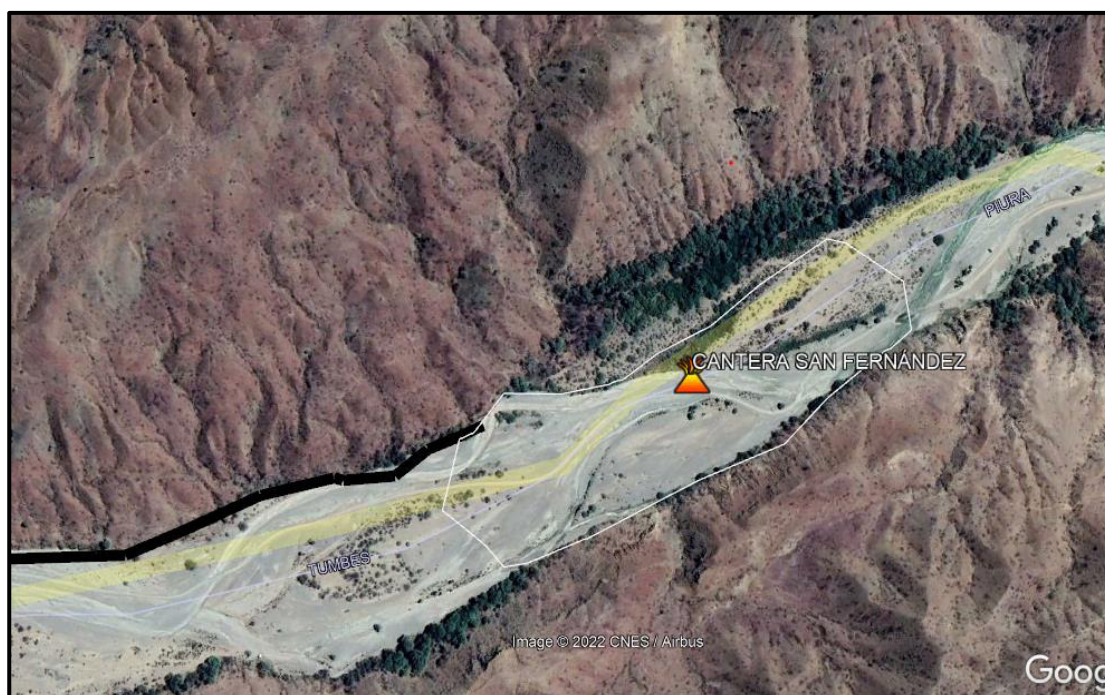
Acceso a la cantera Fernández desde la Ruta PE-1N



Nota. Fuente: Elaboración Propia.

Figura 11

Ubicación y Área aproximada de la cantera Fernández



Nota. Fuente: Elaboración Propia.

Los materiales empleados deben ajustarse a las especificaciones técnicas establecidas. En particular, los agregados gruesos y finos utilizados en la mezcla asfáltica en caliente deben cumplir con lo dispuesto en el Manual de Carreteras – Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción EG-2013, Subsección 415.02(a), observando los criterios detallados en las tablas 423.01 y 423.02 correspondientes al agregado grueso y al agregado fino, respectivamente.

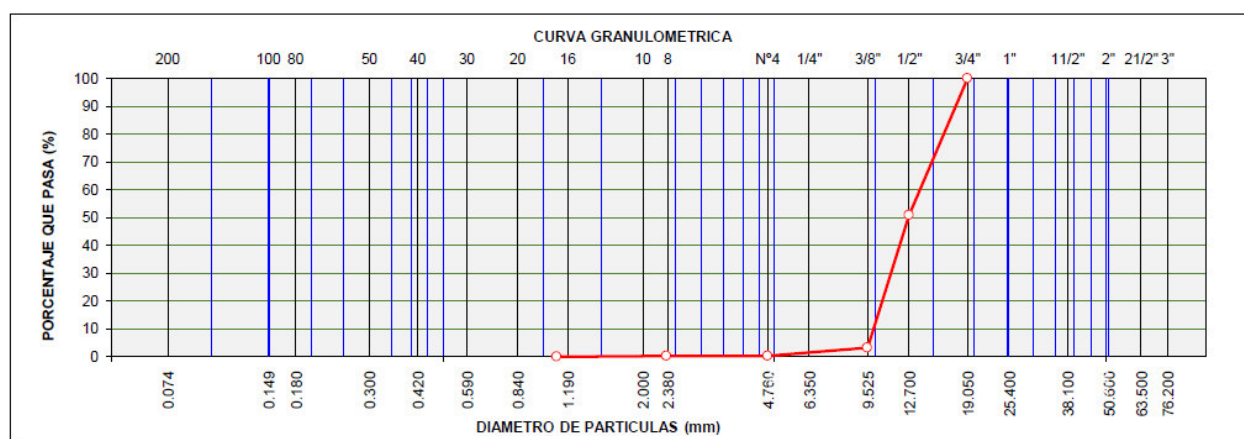
4.1.1 Agregado Grueso

El agregado grueso empleado en esta investigación procede de la Cantera Fernández y corresponde a una grava totalmente triturada mediante procesamiento en planta chancadora. Este material debe cumplir con los parámetros técnicos especificados en la Tabla N.º 02, conforme a los requisitos normativos establecidos.

Tabla 21*Gradación del Agregado Grueso TM - 3/4"*

Tamiz		Peso	% Retenido	% Retenido	% Pasa
ASTM	mm	Retenido (gr.)	Parcial	Acumulado	
3/4"	19.050	-	-	-	100.0
1/2"	12.700	2,458.0	49.1	49.1	50.9
3/8"	9.525	2,385.2	47.7	96.8	3.3
1/4"	6.350	142.5	2.9	99.6	0.4
Nº4	4.760	5.0	0.1	99.7	0.3
Nº8	2.360	1.3	0.0	99.7	0.3
Nº50	0.297	0.3	0.0	99.7	0.3
Nº80	0.180	1.0	0.0	99.8	0.2
Nº100	0.149	3.0	0.1	99.8	0.2
Nº200	0.075	1.1	0.0	99.8	0.2
Pasante		7.6	0.2	100	
Total		5,005.0			

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

Figura 12*Gráfico de Gradación del Agregado Grueso TM - 3/4"*

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 22

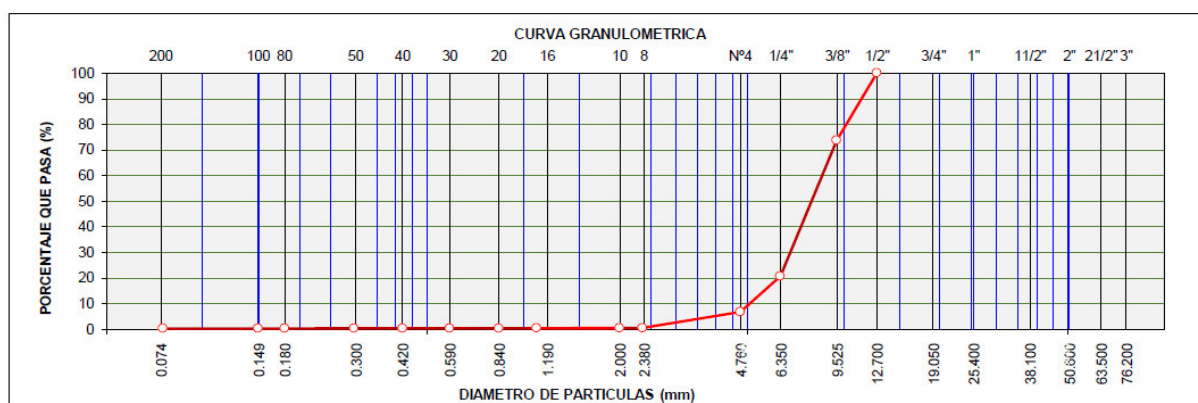
Gradación del Agregado Grueso TM - 1/2"

Tamiz		Peso	% Retenido	% Retenido	% Pasa
ASTM	mm	Retenido (gr.)	Parcial	Acumulado	
1/2"	12.700	-	-	-	100.0
3/8"	9.525	1,329.9	26.2	26.2	73.9
1/4"	6.350	2,698.5	53.1	79.2	20.8
Nº4	4.760	709.2	13.9	93.2	6.8
Nº8	2.360	317.0	6.2	99.4	0.6
Nº10	2.000	2.9	0.1	99.4	0.6
Nº16	1.100	3.0	0.1	99.5	0.5
Nº20	0.840	0.7	0.0	99.5	0.5
Nº30	0.590	0.4	0.	99.5	0.5
Nº40	0.420	0.6	0.0	99.5	0.5
Nº50	0.297	0.8	0.0	99.5	
Nº80	0.180	1.4	0.0	99.6	0.4
Nº100	0.149	0.6	0.0	99.6	0.4
Nº200	0.075	2.6	0.1	99.6	0.4
Pasante		18.3	0.4	100	
Total		5,085.90			

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

Figura 13

Gráfico de Gradación del Agregado Grueso TM - 3/4"



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Además, para el agregado se realizó diferentes ensayos para determinar si cumple los parámetros técnicos mínimos, tal como indica en el Manual de carreteras - Especificaciones Técnicas EG 2013 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Tabla 23

Verificación de las características físicas del agregado grueso

ASTM	Norma	Requerimientos	Resultados	Criterios de Aceptación
Durabilidad (Sulfato de magnesio)	MTC E209	18% máx.	6.6%	Cumple
Abrasión Los Ángeles	MTC E207	40% máx.	17%	Cumple
Índice de durabilidad	MTC E214	35% min.	84%	Cumple
Partículas Chatas y Alargadas	ASTM 4791	10% máx.	3.1%	Cumple
Caras Fracturadas	MTC E210	85/50	100/98.4	Cumple
Sales solubles	MTC E219	0.50% máx.	0.089%	Cumple
Adherencia	MTC E517	+95%	+95%	Cumple
Absorción (*)	MTC E206	1.02% máx.	1.02%	Cumple

Nota: *Excepcionalmente se aceptarán porcentajes mayores sólo si se aseguran las propiedades de durabilidad de la mezcla asfáltica

4.1.2 Agregado Fino

Es fundamental que los finos cumplan con los requisitos técnicos establecidos en la Tabla 03. Por consiguiente, en este estudio, los finos utilizados proceden de la Cantera Fernández y consisten en arena triturada exclusivamente por una planta de trituración.

Tabla 24

Gradación de Arena Chancada TM - <3/8

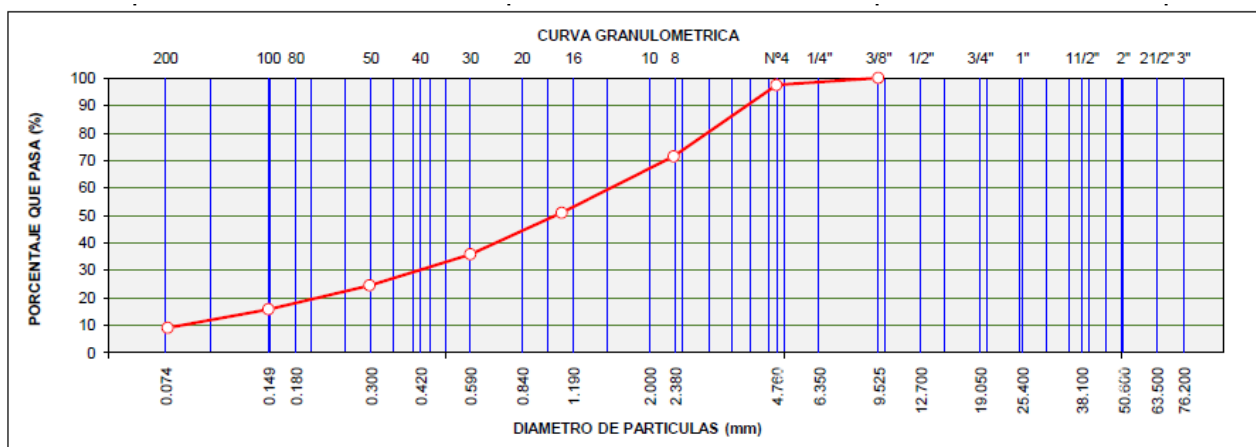
Tamiz		Peso	% Retenido	% Retenido	% Pasa
ASTM	mm	Retenido (gr.)	Parcial	Acumulado	
3/8"	9.525	-	-	-	100.0
Nº4	4.760	32.2	2.6	2.6	97.4

N°8	2.360	321.0	25.9	28.5	71.5
N°10	2.000	69.4	5.6	34.1	65.9
N°16	1.100	185.9	15.0	49.1	50.9
N°20	0.840	115.2	9.3	58.4	41.6
N°30	0.590	71.9	5.8	64.2	35.8
N°40	0.420	79.3	6.4	70.6	29.4
N°50	0.297	60.7	4.9	75.5	24.5
N°80	0.180	78.1	6.3	81.8	18.2
N°100	0.140	29.7	2.4	84.2	15.8
N°200	0.075	83.0	6.7	90.9	9.1
Pasante		112.8	9.1	100.0	
Total		1,239.20			

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

Figura 14

Gráfico de Gradación de Arena Chancada TM - <3/8"



Nota. Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 25

Gradación de Arena Zarandeada TM - <3/8"

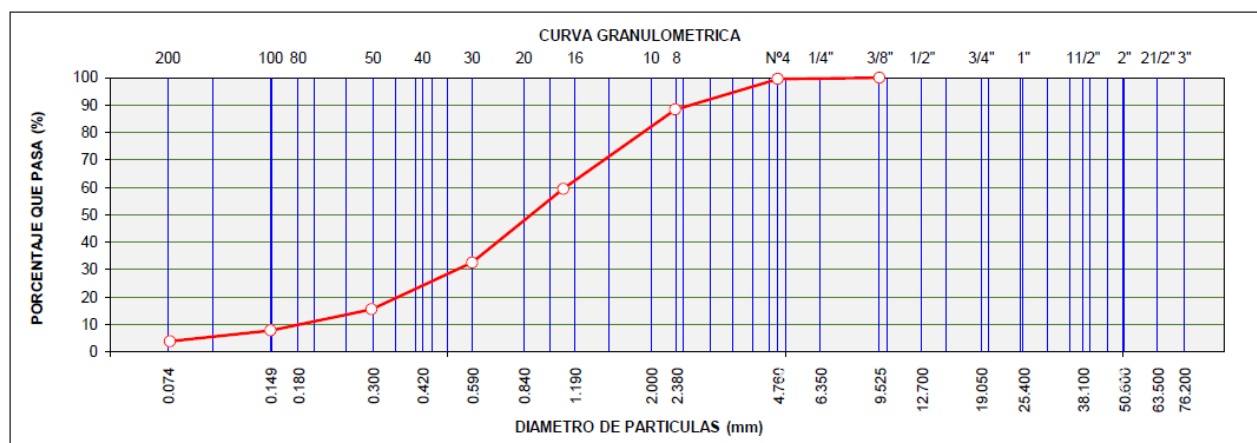
Tamiz		Peso	% Retenido	% Retenido	% Pasa
ASTM	mm	Retenido (gr.)	Parcial	Acumulado	
3/8"	9.525	-	-	-	100.0

N°4	4.760	4.3	0.4	0.4	99.6
N°8	2.360	112.6	11.2	11.6	88.4
N°10	2.000	60.2	6.0	17.6	82.4
N°16	1.100	231.9	23.0	40.6	59.5
N°20	0.840	158.1	15.7	56.2	43.8
N°30	0.590	113.1	11.2	67.4	32.6
N°40	0.420	105.8	10.5	77.9	22.1
N°50	0.297	65.9	6.5	84.5	15.6
N°80	0.180	62.8	6.2	90.7	9.3
N°100	0.140	15.2	1.5	92.2	7.8
N°200	0.075	39.7	3.9	96.1	3.9
Pasante		39.2	3.9	100.0	
Total		1,008.80			

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

Figura 15

Gráfico de Gradación de Arena Chancada TM - <3/8"



Nota. Fuente: Elaboración Provia

4.1.3 Combinación de Agregados

Se llevó a cabo la mezcla de los materiales siguiendo las especificaciones granulométricas establecidas en el plan de trabajo, MAC-2, según Tabla 423-03 de la Sección 423 del Manual de carreteras - Especificaciones Técnicas EG-2013, lo cual se obtuvo esta combinación los siguientes resultados:

Tabla 26*Porcentaje de los Agregados para el diseño de uso MAC-2*

Porcentaje de Agregados	%
Piedra Chancada 3/4"	15.0
Piedra Chancada 1/2"	35.0
Arena Chancada < 3/8"	35.0
Arena Zarandeada < 3/8"	14.5
Filler (Cemento Portland Tipo I)	0.5
Total	100.0

Se verificó la mezcla de materiales mediante el análisis de los espacios vacíos para identificar el esqueleto granular más apropiado de la combinación teórica de los materiales. Una vez obtenida la mezcla, se llevó a cabo la verificación física a través de pruebas granulométricas que se habían calculado previamente según las especificaciones. ASTM D3515 HUSO D5, cuyos resultados son los siguientes:

Tabla 27*Granulometría de combinación Teórica de Agregados*

Malla	mm	Granulometría de los Agregados					ASTM D3515 HUSO D5	
		Arena Natural <3/8"	Arena Chancada <3/8"	Piedra Chancada <3/4"	Piedra Chancada <1/2"	% Pasa	MIN	MAX
1"	25.40	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100	100
3/4"	19.00	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	90	100
1/2"	12.5	100.0	100.0	100.0	50.9	92.6		
3/8"	9.500	100.0	100.0	73.9	3.3	76.4	56	80
Nº4	4.750	89.3	97.4	6.8	0.3	50.0	35	65
Nº8	2.360	75.2	71.5	0.6	0.3	36.7	23	49

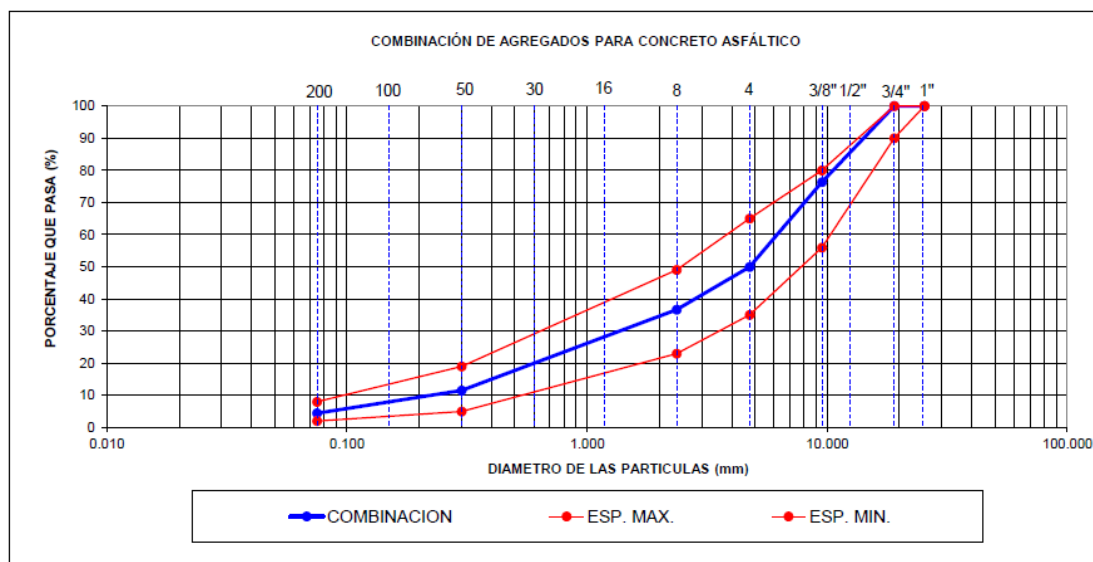
Nº16	1.180	59.0	50.9	0.5	0.3	27.1		
Nº30	0.600	36.4	35.8	0.5	0.3	18.5		
Nº50	0.300	15.5	24.5	0.5	0.3	11.5	5	19
Nº100	0.150	6.9	15.8	0.4	0.2	7.2		
Nº200	0.075	4.0	9.1	0.4	0.2	4.4	2	8

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

Después de analizar los resultados de la Tabla 27, La curva de granulometría se elabora considerando la combinación de los materiales pétreos y ajustando los valores del MAC-2, con Arena Natural < 3/8" con 14.5%, Arena Chancada < 3/8" con 35.0%, Grava Chancada < 1/2" con 35.0% y Grava Chancada < 3/4" con 15.0%. además, estos agregados cumplen con los requerimientos técnicos determinados teóricamente con las especificaciones ASTM D3515 HUSO D5, cuyos resultados son los siguientes:

Figura 16

Gráfico de Granulometría de combinación Teórica de Agregados



Nota. Fuente: Elaboración Propia

4.1.4 Diseño de Grado de Desempeño del Asfalto (PG 76 - 10)

En el presente estudio, la selección del ligante asfáltico para la mezcla en caliente se

realiza con el propósito de garantizar su durabilidad frente a las condiciones ambientales y su adecuado desempeño, conforme a lo establecido en el documento técnico EG-2013 del MTC. En esta investigación, la elección del aglutinante se basa en la temperatura característica de la zona de estudio, correspondiente a la cantera Fernández, de acuerdo con lo indicado en la Tabla 20.

4.1.4.1 Cáculo de la Temperatura Máxima del Pavimento. En la Presente investigación de mediaron temperaturas a 20mm de profundidad del pavimento que fueron realizados en el presente año los cuales fueron los siguientes resultados:

$$T_{max} = 32.7 + 0.837 T_{max\ aire} - 0.0029 Lat^2 + z (\sigma^2 + \delta^2_{modelo})^{0.5}$$

Donde:

T máx.: Temperatura máxima estimada del pavimento a 20 mm de profundidad (°C)

T máx. aire: Temperatura máxima registrada del aire (°C)

Lat: Latitud del sitio del proyecto (°)

Z: Valor correspondiente al nivel de confiabilidad según la distribución normal

δ modelo: Error estándar del modelo, con un valor de 2.1 °C

σ: Desviación estándar de los datos meteorológicos utilizados

Con base en los datos recopilados y aplicando la fórmula respectiva, se obtuvo una temperatura máxima del pavimento (T máx.) de 73.1 °C.

4.1.4.2 Cáculo de la Temperatura Mínima del Pavimento. De la misma forma para la presente investigación de mediaron temperaturas a 20mm de profundidad del pavimento que fueron realizados en el presente año, además se adjunta un gráfico de temperaturas mínimas según datos del SENAMI los cuales fueron los siguientes resultados:

$$T_{min} = -1.56 + 0.72 T_{air} - 0.004 Lat^2 + 6.26 Log_{10} (H + 25) - z (4.4 + 0.52 S_{air}^2)^{0.5}$$

Donde:

T min aire: Temperatura mínima estimada en la superficie del pavimento (°C)

T air: Temperatura mínima del aire (°C)

Lat: Latitud de la estación meteorológica (°)

H: Profundidad desde la superficie del pavimento (mm)

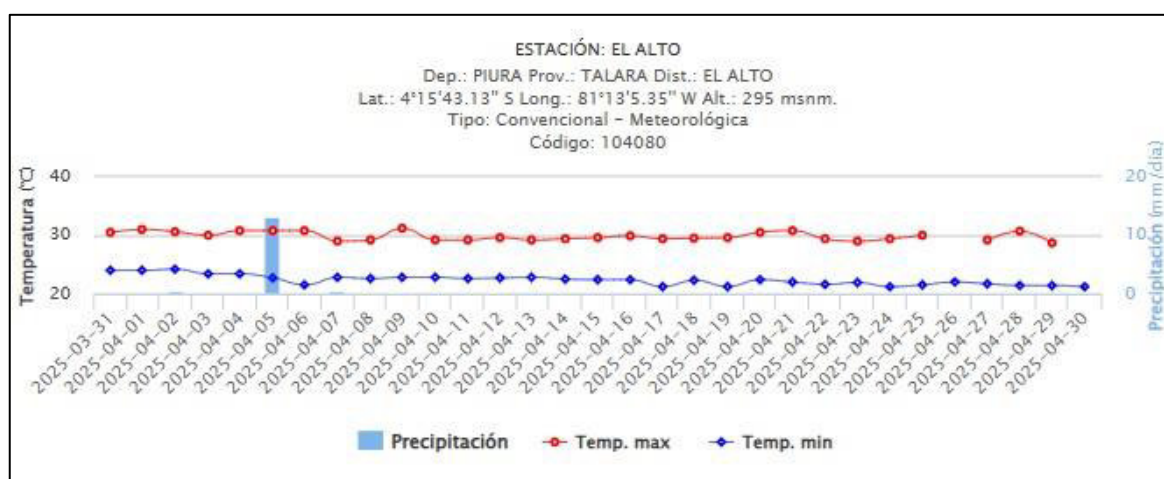
Sair: Desviación estándar de los datos registrados

Z: Valor correspondiente al nivel de confiabilidad (según la distribución normal)

En este estudio, considerando los datos climáticos históricos y el nivel de confiabilidad establecido, se obtuvo una temperatura mínima en la superficie del pavimento de -18 °C.

Figura 17

Gráfico de Datos Hidrometereológicos en la estación EL ALTO - SENAMI



Nota. Fuente: SENAMI - Perú

4.1.4.3 Ensayo del Ligante Asfáltico Modificado PG 76-10. Se llevaron a cabo diversas pruebas al aglutinante asfáltico (BITUMEN PG 76-10), el cual se empleó en las mezclas asfálticas en caliente. En el Tabla 28 se presentan los análisis de las características físicas del ligante asfáltico. En otra evaluación (ver Tabla 29), Es posible observar los datos de las características reológicas del aglutinante (evaluación del Nivel de Rendimiento), además de los hallazgos obtenidos se elaboró el gráfico de viscosidad con el intervalo de temperaturas de mezcla asfáltica y compactación.

Tabla 28

Resultados de ensayos de evaluación de las propiedades del asfalto Modificado PG 76-10
(BITUASFALTO PG76-10)

ENSAYOS	Und.	Norma	Especificaciones		RESULTADO	
			Técnicas EG-2013 Tipo ID			
			Min.	Max.		
PRUEBAS SOBRE EL PRODUCTO ORIGINAL						
Penetración	100gr, 5 seg a 25 °C	dmm	ASTM D-5	40	75	45
Viscosidad absoluta	60°C	P	ASTM D-2171	5000	-	28412
Viscosidad cinemática	135°C	cSt	ASTM D-2170	-	3000	1649
Viscosidad brookfield	135°C	cP		-	-	1832
	145°C	cP	ASTM D-4402	-	-	1109
	175°C	cP		-	-	291
Punto de inflamación		°C	ASTM D-92	232	-	284
Soluble en tricloroetileno		%	ASTM D-2042	99	-	99.71
Recuperación elástica lineal	Método A, 10cm a 25°C	%	ASTM D-6084	60	-	78
Punto de ablandamiento		°C	ASTM D-36	60	-	63
Estabilidad diferencia entre PA (anillo y bola) de porción superior e inferior	163 °C, 48 horas	°C	ASTM D-7373 ADTM D-36	-	2.2	1.8
PRUEBAS SOBRE EL RESIDUO DESPUES DE RFTO						
Recuperación elástica lineal	Método A, 10cm a 25°C	%	ASTM D-6084	60	-	77
Penetración	200 gr, 60 seg a 4°C	dmm	ASTM D-2171	10	-	21
Estabilidad diferencia entre PA (anillo y bola) de porción superior e inferior	163 °C, 48 horas	°C	ASTM D-2171	-	10	1.5

Nota. Fuente: Laboratorios de la Empresa BITUPER S.A.C

Tabla 29

Resultados de ensayos del asfalto Modificado PG 76-10 (BITUASFALTO PG76-10)

ENSAYOS	Und.	Norma	Especificaciones		RESULTADO
			Técnicas EG-2013 Tipo ID		
			Min.	Max.	
PRUEBAS SOBRE EL PRODUCTO ORIGINAL					
Punto de inflamación	°C	ASTM D-92	5000	-	28412
Viscosidad brookfield a 135°C	Pa.s	ASTM D-4402	-	3000	1649
Viscosidad brookfield a 135°C	Pa.s	ASTM D-4402	Reportar		284
Temperatura de falla (G°/Senδ) = 1.00 Kpa	°C	ASTM D-7175	99	-	99.71
Modulo reológico de corte dinâmico a 70°C (G°/Senδ) min. 1.00 Kpa	Kpa	ASTM D-7175	60	-	78
PRUEBAS SOBRE EL RESIDUO DESPUES DEL RFTOT (ASTM 2872)					
Pérdida de masa en el horno de lámina delgada de película en movimiento a 183°C	%	ASTM D-2872	-	1.0	0.233
Temperatura de falla (G°/Senδ) = 2.20 Kpa	°C	ASTM D-7175	76	-	89.9
Modulo reológico de corte dinámico a 76°C (G°/Senδ) min. 2.20 Kpa	Kpa	ASTM D-7175	2.2	-	6.770
Greep Compliance No Recuperable a Jnr 3.2 kPa a 76°C	Kpa-1	ASTM D-8239	Reportar		0.454
Recuperación elástica por MSCR a 3.2Mpa	%		30	-	41.11
PRUEBAS SOBRE EL RESIDUO DESPUES DE PAV (ASTM 2872)					
Modulo reológico de corte dinámico a 37°C (G°/Senδ) máx. 5000 Kpa	Kpa	ASTM D-7175	-	5000	811.0

Rigidez en creep a 0°C, 60 seg	Mpa	ASTM 6648	D-	300	21.15
Valor m(t) a 0°C, 60 seg	-	ASTM 6648	D-	0.3	0.317
Tensión directa esfuerzo-deformación a 0°C, a 1.0mm/min	%	ASTM 6723	D-	1.0	N.A.

Nota. Fuente: Laboratorios de la Empresa BITUPER S.A.C

Figura 18

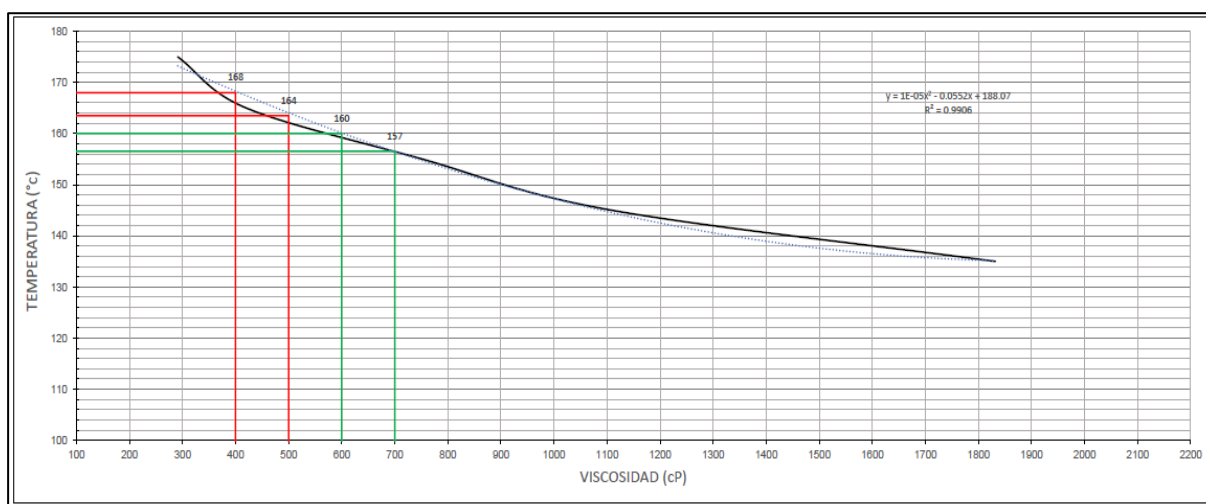


Gráfico de curva de Viscosidad (cP) vs. Temperatura (°C)

Nota. Fuente: Laboratorios de la Empresa BITUPER S.A.C

4.2 Diseño Marshal de Mezcla Asfáltica (ASTM D 3515 T5).

En el presente estudio, la formulación de la mezcla asfáltica se realizó conforme a lo establecido en la sección MTC E 504, la cual regula la evaluación de la resistencia de mezclas asfálticas mediante el procedimiento Marshall, según los lineamientos descritos en el Manual de Ensayo de Materiales del año 2016. Esta metodología permite la caracterización de los parámetros Marshall, los cuales son fundamentales a fin de definir la proporción óptima de ligante en la mezcla bituminosa. Para esta investigación se empleó un ligante asfáltico PG 76-10, modificado con un 3% de polímero estireno-butadieno-estireno (SBS) y un aditivo mejorador de adherencia de marca QUIMIBOND 300 en una proporción del 0.5% respecto al peso del ligante. La selección del contenido de polímero se sustentó en diversos estudios que

reportan la eficacia de dosificaciones entre 3% y 4% de SBS para mejorar el rendimiento mecánico y funcional de las mezclas, dado que este aditivo contribuye significativamente a la elasticidad del ligante, así como a su resistencia al ahuellamiento y a la fatiga (Ohm et al., 2024). Investigaciones previas también han empleado proporciones cercanas, como el 2.5% de SBS sobre el peso del ligante, basadas en recomendaciones técnicas de especialistas coreanos y en la experiencia del equipo investigador, a fin de determinar la proporción óptima del ligante, buscando mejorar el desempeño global de la mezcla asfáltica (K.-N. Kim & Le, 2023). En ese sentido, la dosificación adoptada del 3% permitió alcanzar la clasificación reológica PG 76-10 requerida, asegurando así un desempeño mejorado frente a condiciones térmicas y de carga exigentes (Alsolieman et al., 2021).

Con el objetivo de definir la cantidad adecuada de aglutinante, se crearon combinaciones asfálticas con cinco niveles de aplicación de asfalto alterado: 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0% y 6.5%. Para cada uno de estos porcentajes, se elaboraron tres probetas, cuyos resultados fueron promediados, siempre que no existiera una variación significativa entre ellos, garantizando así la consistencia de los datos. Durante la elaboración de las mezclas, se mantuvo una temperatura de 150 °C, y la compactación se efectuó a 145 °C con la ejecución de 75 golpes en cada lado. En la Tabla 30 se especifican los resultados de los valores de los parámetros Marshall para cada nivel de dosificación.

Tabla 30

Resultado de diseño Marshall de la mezcla asfáltica con ligante asfáltico PG76-10 modificado con polímero y un aditivo de adherencia.

Asfalto (%)	Peso unitario (g/cm³)	Peso Específico Máximo (g/cm³)	Vacíos de aire (%)	Vacíos agregado mineral – VMA (%)	Vacíos Llenos con Asfalto – VFA (%)	Estabilidad Marshall (Kg)	Flujo (0.01 in)
--------------------	---	--	---------------------------	--	--	----------------------------------	------------------------

4.5	2.25	2.446	8.1	17.3	53.3	1778.0	7.3
5.0	2.28	2.426	6.1	16.7	63.5	1862.0	8.7
5.5	2.30	2.408	4.4	16.3	72.8	1953.0	11.0
6.0	2.31	2.390	3.2	16.3	80.1	2018.0	12.7
6.5	2.33	2.370	1.6	16.1	89.9	1997.0	14.7

Nota. Fuente: Laboratorios de la Empresa BITUPER S.A.C

Determinar la cantidad ideal de aglutinante para la combinación de asfalto caliente modificado, se basó en la consideración de un nivel de vacíos de aire del 4.1%, valor que se encuentra dentro del intervalo recomendado por la normativa técnica vigente. A partir de este criterio, se identificó un contenido óptimo de asfalto del 5.7%, el cual fue validado mediante la fabricación de tres probetas adicionales. Los resultados obtenidos confirmaron la conformidad de todos los parámetros Marshall con los requisitos establecidos en la norma MTC E 504, lo que evidencia la adecuación técnica del diseño propuesto. Los valores correspondientes a esta dosificación óptima se presentan en la Tabla 31 y Tabla 32.

Tabla 31

Resultado de diseño Marshall de la mezcla asfáltica con ligante asfáltico PG76-10 modificado con polímero y un aditivo de adherencia.

Descripción	Unid.	Ensayo			Promedio
		1	2	3	
Altura de briqueta	mm	63.00	63.80	63.40	
% de cemento asfáltico en peso de la mezcla	%	5.7	5.7	5.7	5.7
% de Grava Triturada en Peso de la Mezcla	%	47.15	47.15	47.15	
% de Arenas Combinadas en Peso de la Mezcla	%	46.68	46.68	46.68	
% de Agregado Filler en Peso de la Mezcla	%	0.47	0.47	0.47	
Peso Específico Aparente del Cemento Asfáltico	gr./cc.	1.023	1.023	1.023	
Peso Específico Bulk de la Grava Triturada	gr./cc.	2.577	2.577	2.577	
Peso Específico Aparente de la Grava Triturada (AASHTO T85)	gr./cc.	2.664	2.664	2.664	
Peso Específico Bulk de la Arena Combinada	gr./cc.	2.617	2.617	2.617	
Peso Específico Aparente de la Arena Combinada (AASHTO T84)	gr./cc.	2.69	2.69	2.69	
Peso Específico Aparente del Filler	gr./cc.	2.732	2.732	2.732	
Peso de la Briqueta al Aire	gr	1153.7	1157.6	1156.7	
Peso de la Briqueta Superficialmente Seca	gr.	1157.1	1161.4	1160.6	

Peso de la Briqueta Sumergida	gr.	654.6	657.1	658	
Volumen de la Briqueta = 13-14	C.C	502.5	504.3	502.6	
Peso Específico Bulk de la Briqueta = 12/15	gr./cc.	2.296	2.295	2.301	2.298
Peso Específico Máximo (RICE) ASTM D-2041	gr./cc.	2.396	2.396	2.396	
Máxima Densidad Teórica de los Agregados = $100 / ((2/6) + (3/8) + (4/10) + (5/11))$	gr./cc.	2.451	2.451	2.451	
% de Vacíos = $100 * (17-16) / 17$	%	4.2	4.2	3.9	4.1
Peso Específico Bulk del Agregado total = $(100-2) / ((3/Pr.8) + (4/Pr.10) + (5+Pr.11))$	gr./cc.	2.597	2.597	2.597	2.597
Peso Específico Efectivo del Agregado total = $(3+4) / ((100/17) - (2/6))$	gr./cc.	2.607	2.607	2.607	
Peso Específico Aparente del Agregado total = $(100-20) / ((3/8) + (4/10))$	gr./cc.	2.677	2.677	2.677	
Asfalto absorbido por el Peso del Agregado = $100 * 6 * (21-20) / (21 * 20)$	%	0.15	0.15	0.15	
% del Volumen del Agregado x Volumen Bruto de la Briqueta = $(3+4) * (16/20)$	%	82.94	82.92	83.14	
% del Volumen Asfalto Efectivo / Volumen de Probeta = $100 - (24+19)$	%	12.89	12.89	12.92	
% Asfalto Efectivo - Peso de la Mezcla = $2 - ((23/100) * (3+4))$	%	5.56	5.56	5.56	
VMA = $100 - 24$	%	16.65	16.66	16.44	16.6
Relación Betún - Vacíos (% de Vacíos llenados con C.A.) = $(25/27) * 100$	%	74.9	74.9	76	75.3
Lectura del Dial Anillo Marshall		466	454	438	
Estabilidad sin corregir (Según Carta de Calibración)	Kg.	1915	1866	1801	
Factor de Estabilidad (Factor de Corrección según alturas)		1.04	1.04	1.04	
Estabilidad corregida (Kg) = $(30 * 31)$	Kg.	1990	1940	1875	1935
Flujo	0.01"	10	8	0	9.33
Relación Polvo/Cemento Asfáltico	%		0.78		

Nota. Fuente: Laboratorios de la Empresa BITUPER S.A.C

Tabla 32

Resumen del resultado del diseño Marshall optimo con ligante asfáltico PG76-10 modificado con un 3% de polímero SBS y aditivo de adherencia.

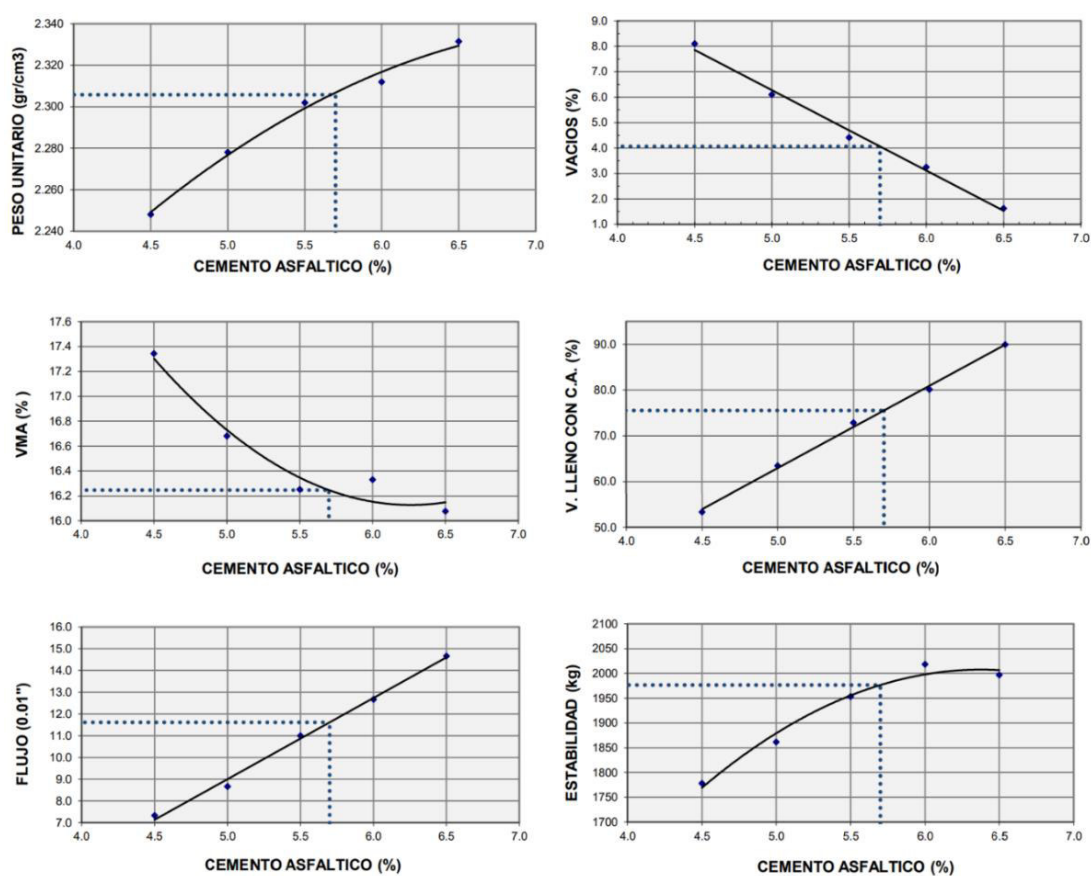
Propiedad	Und.	Diseño	Requerimiento MTC- E 504
Compactación		75 golpes	
Porcentaje de asfalto	(%)	5.7	-
Peso unitario	(g/cm ³)	2.298	-
Vacíos	(%)	4.1	3- 5%
VMA	(%)	16.6	Min. 14

VFA	(%)	75.3	-
Estabilidad Marshall	kg	1935	Min. 832
Flujo	0.01 in	9.33	8-14
Relación polvo/ asfalto efectivo		0.78	0.6-1.3

Nota. Fuente: Laboratorios de la Empresa BITUPER S.A.C

Figura 19

Curvas de relación entre los parámetros de diseño Marshall y el contenido de ligante asfáltico PG76-10 modificado con polímero y aditivo.



Nota. Fuente: Laboratorios de la Empresa BITUPER S.A.C

Figura 20*Compactación de especímenes Marshall.**Nota.* Fuente: Elaboración Propia**Figura 21***Compactación de especímenes Marshal parte 02.**Nota.* Fuente: Elaboración Propia**4.3 Ensayo a la Resistencia a la Humedad TSR (AASHTO T 283).**

En el presente trabajo se ejecutó el ensayo de Resistencia a la Humedad, conocido como método TSR (Tensile Strength Ratio), donde se presentan los datos de la Tabla 33 que reflejan el rendimiento de una mezcla asfáltica elaborada con asfalto PG76-10 modificado con SBS y

un aditivo para mejorar la adherencia, bajo condiciones secas y húmedas. En estado seco, la mezcla alcanzó una resistencia promedio a la tracción indirecta de 9.8 kg/cm², mientras que en condición húmeda dicho valor fue de 6.45 kg/cm². Además, se determinó un índice de resistencia a la tracción (TSR) de 86.2 %. Según los criterios establecidos en la Tabla 33, este valor supera el umbral mínimo del 80 % exigido por la norma AASHTO T 283, lo que evidencia un adecuado desempeño frente a la susceptibilidad a la humedad (T. AASHTO, 2014).

Tabla 33

Daño por humedad de la mezcla asfáltica modificada con con polímeros SBS y aditivo de adherencia.

Muestra	Grupo Seco			Grupo Húmedo		
	1	2	3	4	5	6
Diámetro (cm)	6.67	6.78	6.73	6.75	6.69	6.73
Altura (cm)	10.16	10.14	10.13	10.11	10.14	10.12
W. Aire (g)	1154.4	1152.2	1152.6	1155.1	1153.5	1154.8
W.SSS (g)	1163.9	1160.5	1159.9	1164.8	1162.5	1164.1
W. Agua (g)	645	641.5	640.9	643.4	642.4	644.5
Volumen (cm3)	518.9	519	2.396	521.4	520.1	519.6
Densidad (g/cm3)	2.396	2.396	2.396	2.396	2.396	2.396
% Vacíos	7.1	7.3	7.3	7.5	7.4	7.2
Muestra saturada en vacío entre 19 a 28 pulgHg de 10 a 15 min a 25 °C						
W.SSS (g)				1184.1	1181.2	1181.7
W. Agua (g)				659.3	658.5	659.1
Sat. (%)				73.8	71.7	71.5
Condición de congelamiento a -16 °C por 16 hrs, seguido de saturación por 24 horas a 60°C y 1 hora a 25 °C						
Diámetro (cm)				6.75	6.7	6.73
Altura (cm)				10.12	10.15	10.12
W.SSS (g)				1183.1	1180.2	1181
W. Agua (g)				658.2	657.5	658.3
Carga de tracción indirecta (kg)	1018	1042.6	1087.8	894.7	915.2	902.9

Resistencia (kg/cm²)	9.57	9.66	10.16	8.34	8.57	8.44
Resistencia promedio (kg/cm²)		9.8			8.45	
TSR (%)	86.2					

Nota. Fuente: Laboratorios de la Empresa BITUPER S.A.C

4.4 Ensayo de Rueda de Hamburgo (AASHTO T 324).

En este estudio se llevó a cabo el ensayo de huella de mezclas asfálticas, cuyos resultados revelan el comportamiento de la mezcla asfáltica que contiene un asfalto PG76-10 modificado con polímeros SBS al 3% y un aditivo de adherencia al 0.5% (en relación al peso del ligante). Durante las pruebas a una temperatura de 50 °C, el compuesto experimentó una deformación permanente máxima de 4.45 mm después de completar 20 000 ciclos. Los resultados obtenidos muestran la capacidad de la mezcla para resistir deformaciones permanentes y pérdida de cohesión inducida por la presencia de agua, el cual tiende a manifestarse tras el punto de inflexión entre fluencia y desprendimiento (Hamid et al., 2022). Se observa, además, que la incorporación de dichos aditivos no genera efectos adversos sobre la resistencia frente al daño por humedad.

Tabla 34

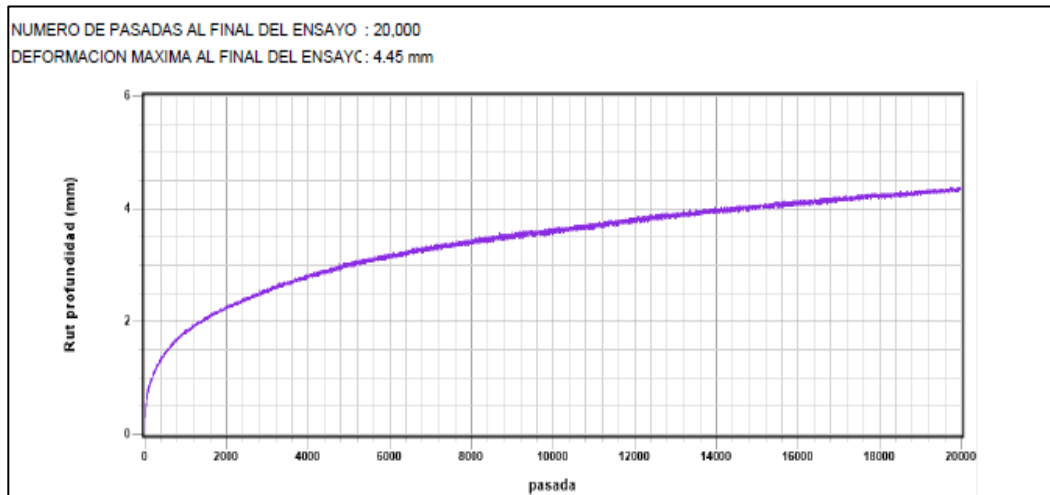
Resultados del ensayo de Rueda de Hamburgo.

Mezcla asfáltica	Nº de pasadas	Profundidad de ahuellamiento (mm)
Ligante PG76-10 modificado con polímero SBS y aditivo de adherencia	20000	4.45

Nota. Fuente: Laboratorios de la Empresa BITUPER S.A.C

Figura 22

Curvas de resultados del ensayo de resistencia al ahuellamiento permanente usando asfalto PG76-10 modificado con polímero SBS y aditivo de adherencia.



Nota. Fuente: Laboratorios de la Empresa BITUPER S.A.C

Figura 23

Compactación de especímenes con un compactador giratorio para el ensayo de rueda de Hamburgo.



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Figura 24

Ensayo en la máquina de rueda de Hamburgo.



Nota. Fuente: Elaboración Propia

4.5 Ensayo del Módulo Resiliente (AASHTO TP 31).

En la redacción de este informe de investigación, se siguió el protocolo indicado en la normativa AASHTO TP31. Se fabricaron dos objetos cilíndricos con un diámetro de 99.9 mm y una altura de 62.84 mm, lo que corresponde a un área de sección transversal de 7830.4 mm². La muestra N.º 1 fue acondicionada en aire durante 4 horas a 20 °C, mientras que la muestra N.º 2 se expuso durante 24 horas a 40 °C. A ambas se les aplicaron cinco pulsos de precarga antes del ensayo principal, utilizando un ancho de pulso de 100 ms, un periodo de reposo de 900 ms y un ciclo total de repetición de 1000 ms. Las cargas de contacto iniciales fueron de 500 N y 159 N, seguidas de cargas máximas de 4996 N para la muestra N.º 1 y 1589 N para la muestra N.º 2. Se consideró un coeficiente de Poisson de 0.35 para el cálculo del módulo resiliente. Estos criterios posibilitaron la descripción del rendimiento mecánico de las combinaciones de asfalto alteradas en diversas situaciones de temperatura y presión.

Tabla 35

Resultados del módulo resiliente de la mezcla asfáltica elaborada con ligante PG76-10

modificado con polímero SBS y aditivo de adherencia, evaluada a una temperatura de 20 °C

Resultado de ensayo	Pulso1	Pulso2	Pulso3	Pulso4	Pulso5	Media	Desv. Stand.	% CV
Módulo resiliente (Mpa)	6763	6698	6734	6698	6673	6713	31.6	0.47
Módulo resiliente instantáneo (Mpa)	8586	8546	8563	8563	8538	8559	16.6	0.19
Fuerza máxima de carga (N)	4986	4996	5001	4990	4999	4994.4	5.61	0.11
Carga de contacto (N)	519	504	496	509	516	509	8.28	1.63
Def. Horizontal recuperable total (mm)	7.27	7.36	7.33	7.35	7.39	7.34	0.04	0.54
Def. Horizontal recuperable total #1 (mm)	4.22	4.24	4.22	4.21	4.19	4.22	0.02	0.39
Def. Horizontal recuperable total #2 (mm)	3.05	3.12	3.11	3.14	3.2	3.12	0.05	1.55
Def. Horizontal instantánea recuperable (mm)	5.73	5.77	5.76	5.75	5.78	5.76	0.02	0.3
Def. Horizontal instantánea recuperable #1 (mm)	3.28	3.3	3.29	3.28	3.28	3.29	0.01	0.24
Def. Horizontal instantánea recuperable #2 (mm)	2.45	2.47	2.47	2.47	2.5	2.47	0.02	0.65

Nota. Fuente: Laboratorios de la Empresa BITUPER S.A.C

Los resultados alcanzados muestran un desempeño mecánico positivo de la combinación de asfalto modificado con polímero SBS y aditivo para mejorar la adherencia. En la Tabla 34, a una temperatura de 20 °C, la muestra N.º 1 presentó un módulo resiliente de 6763 MPa, con una carga máxima de 4986 N y una deformación horizontal recuperable total de 7.27 µm en el primer pulso, superando ampliamente el umbral mínimo de 2965 MPa estipulado por la Guía AASHTO 93 para condiciones de servicio convencionales. Por otro

lado, como se aprecia en la Tabla 35, la muestra N.º 2, ensayada a 40 °C, alcanzó un módulo resiliente de 1511 MPa, con una carga máxima de 1601 N y una deformación horizontal recuperable de 10.45 µm en el tercer pulso.

Tabla 36

Resultados del módulo resiliente de la mezcla asfáltica elaborada con ligante PG76-10 modificado con polímero SBS y aditivo de adherencia, evaluada a una temperatura de 40 °C.

Resultado de ensayo	Pulso1	Pulso2	Pulso3	Pulso4	Pulso5	Media	Desv. Stand.	% CV
Módulo resiliente (Mpa)	1469	1479	1511	1504	1463	1485	19	1.28
Módulo resiliente instantáneo (Mpa)	2162	2162	2169	2160	2135	2158	11.7	0.54
Fuerza máxima de carga (N)	1578	1585	1601	1594	1573	1586.2	10.23	0.64
Carga de contacto (N)	170	157	158	170	179	167	8.28	4.96
Def. Horizontal recuperable total (mm)	10.6	10.57	10.45	10.46	10.61	10.54	0.07	0.66
Def. Horizontal recuperable total #1 (mm)	6.08	6	5.88	5.89	5.99	5.97	0.07	1.25
Def. Horizontal recuperable total #2 (mm)	4.51	4.57	4.57	4.57	4.62	4.57	0.03	0.76
Def. Horizontal instantánea recuperable (mm)	7.2	7.23	7.28	7.28	7.27	7.25	0.03	0.44
Def. Horizontal instantánea recuperable #1 (mm)	4.11	4.09	4.15	4.17	4.14	4.13	0.03	0.69
Def. Horizontal instantánea recuperable #2 (mm)	3.09	3.14	3.13	3.11	3.13	3.12	0.02	0.57

Nota. Fuente: Laboratorios de la Empresa BITUPER S.A.C

4.6 Ensayo del Módulo Dinámico (AASHTO T 342).

En este estudio, se llevaron a cabo pruebas en dos muestras de briquetas, las cuales arrojaron datos sobre el módulo dinámico y el ángulo de fase de mezclas asfálticas que contenían polímeros SBS y aditivos para mejorar la adherencia, evaluadas a distintas temperaturas (-10, 4, 21, 37 y 54 °C) y frecuencias de carga (25, 10, 5, 1, 0.5, 0.1 Hz) (ver Tabla 39). Tal como se observa en la Figura 20, el módulo dinámico de las mezclas incrementa de forma continua con el aumento de la frecuencia de carga, mientras que disminuye progresivamente con el ascenso de la temperatura, lo que confirma el comportamiento viscoelástico de las mezclas asfálticas: predominantemente elástico a bajas temperaturas y más viscoso a temperaturas elevadas. El valor más alto de $|E^*|$ se registró a -10 °C y 25 Hz, mientras que el mínimo se observó a 54 °C y 0.1 Hz. Asimismo, los datos revelan que, a bajas frecuencias (por debajo de 1 Hz), la diferencia en el módulo dinámico entre mezclas es poco significativa, pero se vuelve más evidente en el rango de 1 a 10 Hz, sugiriendo una mayor sensibilidad del módulo dinámico a la frecuencia en condiciones de alta temperatura. Este comportamiento puede estar relacionado con la aparición de deformaciones permanentes, como el ahuellamiento, en tramos viales con pendientes pronunciadas, intersecciones y paraderos, donde los vehículos operan a baja velocidad, frenan con frecuencia y mantienen un contacto prolongado entre los neumáticos y la superficie (H. Wang et al., 2019). Cabe señalar que una frecuencia de 10 Hz representa aproximadamente el tránsito de un vehículo a 60 km/h (Rodríguez et al., 2024).

Tabla 37

Resultados de la Briqueta N°01 del módulo dinámico de la mezcla asfáltica modificada.

ENSAYO DE BRIQUETA N° 1				
Temperatura	Frecuencia	Módulo (Mpa)	Angulo de fase (*)	Parámetro de Fatiga (Mpa)
-10 °C	25	21620	5.81	2188.59

-10 °C	10	19940	6.98	2423.17
-10 °C	5	18803	7.23	2366.41
-10 °C	1	16709	8.36	2429.36
-10 °C	0.5	15763	8.79	2408.80
-10 °C	0.1	13697	10.11	2404.35
4.4 °C	25	12642	12.04	2637.05
4.4 °C	10	11291	12.98	2536.08
4.4 °C	5	10259	13.3	2360.08
4.4 °C	1	8310	15.26	2187.19
4.4 °C	0.5	7544	16.02	2081.94
4.4 °C	0.1	6065	17.48	1821.76
21.1 °C	25	6692	18.08	2076.83
21.1 °C	10	5716	20.09	1963.42
21.1 °C	5	4951	20.29	1716.87
21.1 °C	1	3388	22.4	1291.07
21.1 °C	0.5	2864	23.53	1143.39
21.1 °C	0.1	2165	24.15	885.76
37.8 °C	25	3345	23.76	1347.72
37.8 °C	10	2680	22.97	1045.87
37.8 °C	5	2111	22.71	814.99
37.8 °C	1	1212	26.47	540.22
37.8 °C	0.5	1075	26.32	476.64
37.8 °C	0.1	677	27.65	314.17
54 °C	25	1916	21.24	694.12
54 °C	10	1274	20.19	439.70
54 °C	5	877	22.51	335.75
54 °C	1	450	25.13	191.10
54 °C	0.5	423	24.15	173.06
54 °C	0.1	334	21.57	122.79

Nota. Fuente: Laboratorios de la Empresa BITUPER S.A.C

Tabla 38

Resultados de la Briqueta N°02 del módulo dinámico de la mezcla asfáltica modificada.

ENSAYO DE BRIQUETA N° 2				
Temperatura	Frecuencia	Modulo (Mpa)	Angulo de fase (*)	Parámetro de Fatiga (Mpa)

-10 °C	25	19471	6.14	2082.58
-10 °C	10	17989	6.83	2139.32
-10 °C	5	17228	7.59	2275.53
-10 °C	1	15252	8.7	2307.03
-10 °C	0.5	14427	9.26	2321.52
-10 °C	0.1	12573	10.61	2314.98
4.4 °C	25	12320	10.78	2304.31
4.4 °C	10	11089	12.96	2486.94
4.4 °C	5	10127	13.64	2388.16
4.4 °C	1	8136	15.44	2166.04
4.4 °C	0.5	7393	16.17	2058.86
4.4 °C	0.1	5916	17.59	1787.84
21.1 °C	25	6611	19	2152.33
21.1 °C	10	5592	19.43	1860.21
21.1 °C	5	4862	20.13	1673.26
21.1 °C	1	3317	22.58	1273.64
21.1 °C	0.5	2789	23.92	1130.83
21.1 °C	0.1	2100	24.23	861.84
37.8 °C	25	3373	23.01	1318.48
37.8 °C	10	2657	22.78	1028.77
37.8 °C	5	2103	22.97	820.69
37.8 °C	1	1207	26.16	532.14
37.8 °C	0.5	1069	26.06	469.62
37.8 °C	0.1	670	27.5	309.37
54 °C	25	1886	21.58	693.67
54 °C	10	1267	19.82	429.60
54 °C	5	878	21.6	323.21
54 °C	1	451	25.23	192.24
54 °C	0.5	426	24.24	174.90
54 °C	0.1	341	21.66	125.86

Nota. Fuente: Laboratorios de la Empresa BITUPER S.A.C

Tabla 39

Resultados del módulo dinámico para la mezcla con polímeros SBS y aditivo de adherencia

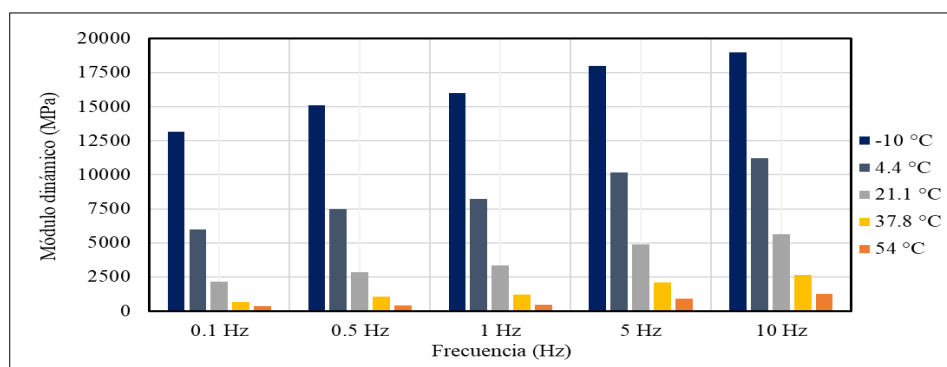
Frecuencia	Temperatura				
	-10 °C	4.4 °C	21.1 °C	37.8 °C	54 °C

25 Hz	20546 MPa 5.98°	12481 MPa 11.41°	6652 MPa 18.54°	3359 MPa 23.39°	1901 MPa 21.41°
10 Hz	18965 MPa 6.91°	11190 MPa 12.97°	5654 MPa 19.76°	2669 MPa 22.88°	1271 MPa 20.01°
5 Hz	18016 MPa 7.41°	10193 MPa 13.47°	4907 MPa 20.21°	2107 MPa 22.84°	878 MPa 22.06°
1 Hz	15981 MPa 8.53°	8223 MPa 15.35°	3353 MPa 22.49°	1210 MPa 26.32°	451 MPa 25.18°
0.5 Hz	15095 MPa 9.03°	7469 MPa 16.10°	2827 MPa 23.73°	1072 MPa 26.19°	425 MPa 24.20°
0.1 Hz	13135 MPa 10.36°	5991 MPa 17.54°	2133 MPa 24.19°	674 MPa 27.58°	338 MPa 21.62°

Nota. Fuente: Laboratorios de la Empresa BITUPER S.A.C

Figura 25

Correlación entre el módulo dinámico y la frecuencia de carga.



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Figura 26

Especímenes sumergidos en agua para el ensayo de módulo dinámico.



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Figura 27

Especímenes para procedimiento del ensayo de módulo dinámico.



Nota. Fuente: Elaboración Propia

4.7 Ensayo de Fatiga 04 Puntos (AASHTO T 321).

Se evaluó la resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas en caliente a través de la prueba de flexión en vigas de cuatro puntos, siguiendo los protocolos indicados en la normativa AASHTO T321-07 (S. T. AASHTO, 2007). El agrietamiento por fatiga, caracterizado por la aparición de fisuras bajo niveles de tensión inferiores a la resistencia última del material debido a cargas repetidas, constituye una de las formas de deterioro más comunes en los pavimentos asfálticos (Sohail Jameel et al., 2023). Este método consiste en someter las probetas a una carga de flexión cíclica constante hasta alcanzar la falla, la cual se define como una disminución del 50 % respecto a la rigidez inicial. Se realizaron los ensayos en modo de control por deformación, a una frecuencia de 10 Hz y a una temperatura fija de 20 °C. Previo al ensayo, las muestras fueron acondicionadas durante 4 horas a la temperatura objetivo dentro de la

cámara de prueba. Se emplearon cuatro niveles de microdeformación: 400, 450 y 500 $\mu\epsilon$, con el fin de analizar la respuesta de fatiga bajo diferentes condiciones de carga.

Figura 28

Espécimen del Ensayo de Viga de Fatiga.



Nota. Fuente: Elaboración Propia.

Figura 29

Espécimen Procedimiento de ensayo de Viga de Fatiga.



Nota. Fuente: Elaboración Propia

4.8 Contrastación de Hipótesis.

La presente investigación evalúa la influencia de polímeros modificadores SBS y aditivos de adherencia en distintas propiedades físico-mecánicas de mezclas asfálticas, incluyendo su resistencia al ahuellamiento, flexión elástica, elasticidad y ley de fatiga. El estudio se desarrolló mediante ensayos experimentales en laboratorio con mezclas modificadas con ligante PG76-10, en condiciones simuladas de tránsito y temperatura. Las hipótesis fueron evaluadas mediante análisis estadísticos como regresiones lineales y coeficientes de correlación, a partir de un conjunto limitado de datos experimentales.

4.8.1 Hipótesis 01

Los polímeros y aditivos de adherencia influyen en la resistencia al ahuellamiento de una mezcla asfáltica en el distrito de Máncora.

Tabla 40

Datos Estadísticos de Resistencia al Ahuellamiento

Mezcla Asfáltica	Nº de pasadas	Profundidad de Ahuellamiento (mm)	Exp.	C1	C2	C3
Ligante PG76-10 modificado con polímero SBS y aditivo de adherencia	20000	4.45	Exp 1	5.70%	3	0.5
	20000	5.60	Exp 2	5.70%	2.9	1.5
	20000	6.43	Exp 3	5.70%	3.1	2.5
	20000	4.80	Exp 4	5.70%	2.8	3.5
	20000	4.85	Exp 5	5.70%	2.9	4.5
	20000	5.72	Exp 6	5.70%	2.7	5.5
	20000	5.16	Exp 7	5.70%	2.8	6.5
	20000	6.14	Exp 8	5.70%	3.1	7.5
	20000	4.83	Exp 9	5.70%	2.9	8.5
	20000	4.78	Exp 10	5.70%	3	9.5

Nota. Fuente: Elaboración Propia

4.8.1.1 Medidas de Ajuste del Modelo (20°C grados). Se puede verificar en la Tabla N° 40, menciona que tan bien el modelo lo cual se ajusta en los siguientes datos:

A. Modelo: Se refiere al modelo estadístico que has creado.

B. R² (R-cuadrado): Tienes un valor de **0.0954**. Este número indica qué porcentaje de la variación en tu variable dependiente (RESISTENCIA AL AHUELLAMIENTO) puede ser explicada por tu variable independiente (POLIMEROS).

- Un R-cuadrado de 0.0954 significa que aproximadamente el 9.54% de la variación en la resistencia al ahuellamiento puede ser explicada por la variable "POLIMEROS" en tu modelo.

- **Interpretación:** Este es un valor de R-cuadrado relativamente bajo. Sugiere que la variable "POLIMEROS" por sí sola no explica una gran parte de la variación en la resistencia al ahuellamiento. Es muy probable que otros factores estén influyendo, o que la relación no sea muy fuerte en este modelo específico.

C. N: El tamaño de la muestra utilizado para este modelo fue de **N=10**. Este es un tamaño de muestra muy pequeño, lo cual puede afectar significativamente la fiabilidad y la capacidad de generalizar tus resultados.

4.8.1.2 Coeficientes del Modelo – Resistencia al Ahuellamiento. En la Tabla N°40, se detalla sobre cada predictor en modelo, como se puede apreciar líneas abajo:

A. Predictor:

- **Constante:** Es el punto donde tu línea de regresión cruza el eje Y. Representa la resistencia al ahuellamiento estimada cuando la variable "POLIMEROS" es cero.

- **POLIMEROS:** Esta es tu variable independiente, que probablemente indica la presencia o cantidad de polímeros.

B. Estimador (Coeficiente):

- **Constante: 0.750**

• **POLIMEROS: 1.550** Esta es la parte más importante. Sugiere que por cada aumento de una unidad en "POLIMEROS", la resistencia al ahuellamiento se estima que aumenta en 1.550 unidades, asumiendo que todos los demás factores se mantienen constantes.

C. EE (Error Estándar): Mide la precisión de tus estimaciones de coeficientes. Errores estándar más pequeños generalmente indican estimaciones más precisas.

- **Constante: 4.930**

- **POLIMEROS: 1.690**

D. tp (Valor t / Estadístico t): Este estadístico se usa para determinar si la variable predictora es significativamente diferente de cero.

- **Constante: 0.152**

- **POLIMEROS: 0.918**

E. p (Valor p): Esta es la probabilidad de observar un estadístico t tan extremo, o más extremo, como el calculado, asumiendo que la hipótesis nula (que el coeficiente es cero) es verdadera.

- **Constante: 0.883**

- **POLIMEROS: 0.385**

F. Interpretación: Un umbral común para la significancia estadística es un valor p menor a 0.05.

• El valor p para POLIMEROS es 0.385, lo cual es mucho mayor que 0.05. Esto significa que, basándose en este modelo y tamaño de muestra, el efecto de "POLIMEROS" sobre la resistencia al ahuellamiento no es estadísticamente significativo. En términos más simples, no tenemos suficiente evidencia para afirmar con confianza que "POLIMEROS" tiene un impacto real y no aleatorio en la resistencia al ahuellamiento en este estudio.

4.8.1.3 Resumen y Conclusiones Clave.

- **Relación Débil:** El valor de R-cuadrado (0.0954) indica que "POLIMEROS" explica solo una pequeña proporción de la variación en la resistencia al ahuellamiento.
- **No Hay Significancia Estadística:** El efecto de "POLIMEROS" sobre la resistencia al ahuellamiento, según la estimación de este modelo, no es estadísticamente significativo (valor $p = 0.385$). Esto significa que, aunque tu modelo estima un aumento en la resistencia al ahuellamiento con los polímeros, este efecto observado podría deberse fácilmente al azar, dada la información disponible.
- **Tamaño de Muestra Pequeño:** El tamaño de muestra tan reducido ($N=10$) es una limitación crucial. Con una muestra tan pequeña, es difícil detectar efectos verdaderos, y tus resultados podrían no ser generalizables a una población más grande.

En resumen, basándonos en este modelo y datos específicos, no hay evidencia sólida que sugiera que "POLIMEROS" influya significativamente en la resistencia al ahuellamiento. El bajo R-cuadrado y el valor p no significativo para el coeficiente de "POLIMEROS", junto con el tamaño de muestra muy pequeño, apuntan a esta conclusión. Podrías considerar recopilar más datos o incluir otras variables en tu modelo para comprender mejor los factores que afectan la resistencia al ahuellamiento.

4.8.2 Hipótesis 02

Los polímeros y aditivos de adherencia influyen en la resistencia a la flexión elástica de una mezcla asfáltica en el distrito de Máncora

4.8.2.1 Medidas de Ajuste del Modelo (20°C grados).

- A. Modelo:** Se refiere al modelo estadístico que has creado.
- B. R^2 (R-cuadrado o Coeficiente de Determinación):** El valor es 0.0926.
 - Esto significa que aproximadamente el **9.26% de la variación en la "media de la función elástica"** puede ser explicada por la variable "POLIMEROS" en tu modelo.

- **Interpretación:** Este es un valor de R-cuadrado bastante bajo. Un R^2 bajo indica que la variable "POLIMEROS" por sí sola explica muy poco de los cambios que ocurren en la "media de la función elástica". Esto sugiere que hay otros factores importantes que influyen en esta propiedad y que no están incluidos en tu modelo, o que la relación entre "POLIMEROS" y la "media de la función elástica" no es muy fuerte.

C. N: El tamaño de la muestra utilizada para este modelo fue de $N=10$.

- **Importancia:** Un tamaño de muestra tan pequeño (10 observaciones) es una limitación muy grande. Con tan pocos datos, es muy difícil que un modelo detecte relaciones significativas, incluso si existen en la realidad. Los resultados de modelos con muestras tan pequeñas deben interpretarse con mucha cautela y no se pueden generalizar fácilmente a una población más grande.

4.8.2.2 Coeficientes del Modelo – Media de la función Elástica. Se detalla sobre como cada variable (o predictor) en tu modelo se relaciona con la “media de la función elástica”

A. Predictor:

- **Constante:** Es el valor estimado de la "media de la función elástica" cuando "POLIMEROS" es cero. En este caso, es **-20447**. Un valor negativo para la constante puede parecer extraño, pero simplemente es el punto de inicio de la línea de regresión cuando tu variable "POLIMEROS" tiene un valor de 0.

- **POLIMEROS:** Esta es tu variable independiente, que probablemente representa la cantidad o presencia de polímeros.

B. Estimador (Coeficiente):

- **Constante:** -20447
- **POLIMEROS:** 7715 Este es el valor clave. Indica que por cada aumento de una unidad en "POLIMEROS", la "media de la función elástica" se estima que aumenta en 7715 unidades, asumiendo que el resto de los factores (si los hubiera) se mantienen constantes.

C. EE (Error Estándar): Mide la precisión de la estimación de tus coeficientes. Un error estándar más pequeño indica una estimación más precisa.

- **Constante:** 24953
- **POLIMEROS:** 8538

D. tp (Valor t / Estadístico t): Este valor se usa para calcular el valor p y determinar si un predictor es estadísticamente significativo.

- **Constante:** -0.819
- **POLIMEROS:** 0.904

E. p (p-valor): Este es el valor más importante para la significancia estadística. Es la probabilidad de obtener un resultado como el observado (o más extremo) si no hubiera una relación real entre "POLIMEROS" y la "media de la función elástica" en la población.

- **Constante:** 0.436
- **POLIMEROS:** 0.393
- **Interpretación:** Generalmente, se considera que un efecto es estadísticamente

significativo si el p-valor es menor a 0.05 (o 5%).

▪ El p-valor para POLIMEROS es 0.393. Como 0.393 es mucho mayor que 0.05, esto significa que el efecto de "POLIMEROS" sobre la "media de la función elástica" NO es estadísticamente significativo. En términos sencillos, la relación que observas entre los polímeros y la función elástica en tu muestra de 10 datos podría ser fácilmente resultado del azar, y no puedes afirmar con confianza que existe una relación verdadera y consistente en la población.

4.8.2.3 Resumen y Conclusiones Clave.

A. Poca Capacidad Explicativa: El R-cuadrado de 0.0926 es bajo. Esto significa que la variable "POLIMEROS" por sí sola explica muy poca de la variabilidad que se observa

en la "media de la función elástica". Hay otros factores o variables que son mucho más importantes para determinar la función elástica.

B. Efecto No Significativo: Aunque el modelo sugiere que los polímeros aumentan la "media de la función elástica" (coeficiente de 7715), este aumento **no es estadísticamente significativo** (el p-valor de 0.393 es alto). Esto quiere decir que no hay suficiente evidencia estadística en tus datos para concluir que este efecto no se debe simplemente al azar.

C. Muestra Demasiado Pequeña: La principal limitación de este análisis es el tamaño de la muestra ($N=10$). Con tan pocas observaciones, es extremadamente difícil obtener resultados estadísticamente significativos o que sean representativos de una población más grande. Cualquier conclusión debe tomarse con mucha precaución.

En síntesis, con los datos procesados, no se puede afirmar que los "POLIMEROS" tienen un impacto estadísticamente significativo en la "media de la función elástica". Para obtener conclusiones más robustas y fiables, sería fundamental aumentar significativamente el tamaño de tu muestra y, posiblemente, considerar la inclusión de otras variables que puedan influir en la función elástica.

4.8.2.4 Medidas de Ajuste del Modelo (40°C grados).

A. Modelo: Se refiere al modelo estadístico que has creado.

B. R^2 (R-cuadrado o Coeficiente de Determinación): El valor es **0.115**.

- Esto significa que aproximadamente el 11.5% de la variación en la "media de la función elástica" puede ser explicada por la variable "POLIMEROS" en tu modelo.

- **Interpretación:** Este R-cuadrado sigue siendo bajo, aunque ligeramente superior al anterior (0.0926). Un R^2 bajo indica que la variable "POLIMEROS" por sí sola explica una porción pequeña de los cambios en la "media de la función elástica". Esto sugiere que hay otros

factores importantes que influyen en esta propiedad y que no están incluidos en tu modelo, o que la relación entre "POLIMEROS" y la "media de la función elástica" no es muy fuerte.

C. **N:** El tamaño de la muestra utilizada para este modelo fue de **N=10**.

- **Importancia:** Como hemos mencionado antes, un tamaño de muestra tan pequeño (10 observaciones) es una limitación muy grande. Con tan pocos datos, es muy difícil que un modelo detecte relaciones significativas, incluso si existen en la realidad. Los resultados de modelos con muestras tan pequeñas deben interpretarse con mucha cautela y no se pueden generalizar fácilmente a una población más grande.

4.8.2.5 Coeficiente del Modelo – Media de la función elástica

A. **Predictor.**

- **Constante:** Es el valor estimado de la "media de la función elástica" cuando "POLIMEROS" es cero. En este caso, es **-5831**.

- **POLIMEROS:** Esta es tu variable independiente, que probablemente representa la cantidad o presencia de polímeros.

B. **Estimador (Coeficiente):**

- **Constante:** -5831
- **POLIMEROS:** 2183 Este es el valor clave. Indica que por cada aumento de una unidad en "POLIMEROS", la "media de la función elástica" se estima que aumenta en 2183 unidades, asumiendo que el resto de los factores (si los hubiera) se mantienen constantes.

C. **EE (Error Estándar):** Mide la precisión de la estimación de tus coeficientes.

- **Constante:** 6253
- **POLIMEROS:** 2139

D. **tp (Valor t / Estadístico t):** Este valor se usa para calcular el valor p y determinar si un predictor es estadísticamente significativo.

- **Constante:** -0.932

- **POLIMEROS: 1.020**

E. **p (p-valor):** Este es el valor más importante para la significancia estadística. Es la probabilidad de obtener un resultado como el observado (o más extremo) si no hubiera una relación real entre "POLIMEROS" y la "media de la función elástica" en la población.

- **Constante: 0.378**

- **POLIMEROS: 0.337**

- **Interpretación:** Generalmente, se considera que un efecto es estadísticamente significativo si el p-valor es menor a 0.05 (o 5%).

- El p-valor para POLIMEROS es 0.337. Como 0.337 es mucho mayor que 0.05, esto significa que el efecto de "POLIMEROS" sobre la "media de la función elástica" NO es estadísticamente significativo. La relación que observas entre los polímeros y la función elástica en tu muestra de 10 datos podría ser fácilmente resultado del azar, y no puedes afirmar con confianza que existe una relación verdadera y consistente en la población.

4.8.2.6 Resumen y Conclusiones Clave

- **Poca Capacidad Explicativa:** El R-cuadrado de 0.115 es bajo. Aunque es un poco más alto que en el análisis anterior, sigue indicando que la variable "POLIMEROS" por sí sola explica muy poca de la variabilidad que se observa en la "media de la función elástica". Esto sugiere que hay otros factores o variables que son mucho más importantes para determinar la función elástica.

- **Efecto No Significativo:** Aunque el modelo sugiere que los polímeros aumentan la "media de la función elástica" (coeficiente de 2183), este aumento **no es estadísticamente significativo** (el p-valor de 0.337 es alto). Esto quiere decir que no hay suficiente evidencia estadística en tus datos para concluir que este efecto no se debe simplemente al azar.

- **Muestra Demasiado Pequeña:** La principal limitación de este análisis sigue siendo el tamaño de la muestra (N=10). Con tan pocas observaciones, es extremadamente

difícil obtener resultados estadísticamente significativos o que sean representativos de una población más grande. Cualquier conclusión debe tomarse con mucha precaución.

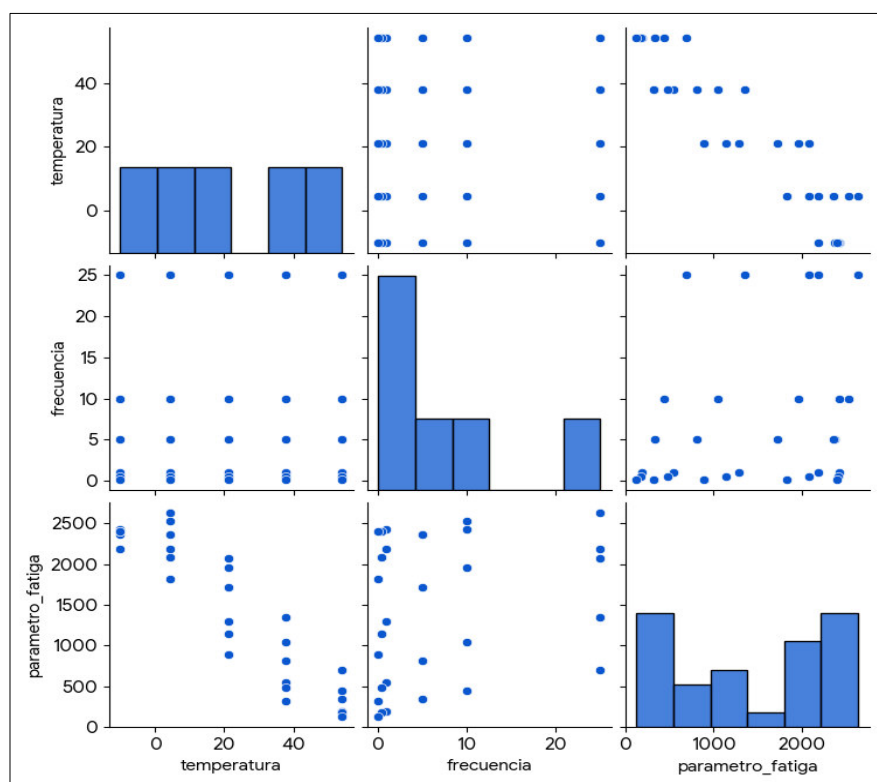
- En síntesis, con los datos procesados, no se puede afirmar que los "POLIMEROS" tienen un impacto estadísticamente significativo en la "media de la función elástica". Aunque el modelo muestra una ligera tendencia, la evidencia estadística no es lo suficientemente fuerte, en gran parte debido al tamaño de tu muestra. Para obtener conclusiones más robustas y fiables, sería fundamental aumentar significativamente el tamaño de tu muestra y, posiblemente, considerar la inclusión de otras variables que puedan influir en la función elástica.

4.8.3 Hipótesis 03

Los polímeros y aditivos de adherencia influyen en la resistencia a la elasticidad de una mezcla asfáltica en el distrito de Máncora

Figura 30

Espécimen Procedimiento Estadístico del ensayo de Viga de Fatiga.



Nota. Fuente: Elaboración Propia

4.8.3.1 Resumen de las Relaciones. La temperatura es el factor que más influye en el parámetro de fatiga, mostrando una fuerte relación inversa. Por otro lado, la frecuencia tiene una influencia mucho menor y ligeramente directa sobre el parámetro de fatiga. La temperatura y la frecuencia no muestran una relación significativa entre sí.

4.8.3.2 Análisis Detallado de las Variables. Para llegar a estas conclusiones, realicé un análisis de correlación y generé gráficos de dispersión que nos permiten visualizar cómo se comportan las variables entre sí.

A. Matriz de Correlación

La matriz de correlación nos da un valor numérico entre -1 y 1 que indica qué tan fuerte es la relación lineal entre dos variables.

- Un valor cercano a 1 indica una relación positiva fuerte (si una sube, la otra también).
- Un valor cercano a -1 indica una relación negativa fuerte (si una sube, la otra baja).
- Un valor cercano a 0 indica una relación débil o nula. Aquí está el mapa de calor de la matriz de correlación de tus datos: Como puedes ver en la imagen, los resultados principales son:

- Temperatura y Parámetro de Fatiga: Correlación de -0.92.
- Frecuencia y Parámetro de Fatiga: Correlación de 0.24.
- Temperatura y Frecuencia: Correlación de 0.00.

4.8.3.3 Interpretación de las Relaciones. Interpretación de qué significan estos números con la ayuda de los gráficos de dispersión. Relación entre Temperatura y Parámetro de Fatiga. Existe una correlación negativa muy fuerte (-0.92) entre la temperatura y el parámetro de fatiga. Esto significa que a medida que aumenta la temperatura, el parámetro de fatiga tiende a disminuir significativamente.

En el gráfico de dispersión, se observa claramente esta tendencia descendente. Los puntos se agrupan en torno a una línea recta que va hacia abajo, lo que confirma la fuerte relación lineal negativa.

Relación entre Frecuencia y Parámetro de Fatiga

La correlación entre la frecuencia y el parámetro de fatiga es de 0.24, lo que se considera una correlación positiva débil. Esto sugiere que hay una ligera tendencia a que el parámetro de fatiga aumente a medida que aumenta la frecuencia, pero esta relación no es muy marcada.

En el gráfico de dispersión correspondiente, se aprecia que los puntos están mucho más dispersos y no siguen una línea clara, lo que refleja la debilidad de esta relación.

Relación entre Temperatura y Frecuencia

La correlación entre la temperatura y la frecuencia es prácticamente cero (0.00). Esto nos indica que no hay una relación lineal discernible entre estas dos variables. En el diseño de tu experimento, los valores de frecuencia no dependen de los valores de temperatura y viceversa.

La figura N°023 de dispersión para estas dos variables mostraría una nube de puntos sin ninguna tendencia o patrón aparente.

4.8.4 Hipótesis 04

Los polímeros y aditivos de adherencia influyen en la resistencia a la fatiga de una mezcla asfáltica en el distrito de Máncora.

Tabla 41

Datos de Contratación de Resistencia a la Fatiga

Viga	Ancho (mm)	Altura (mm)	Largo (mm)	Módulo inicial (Mpa)	Módulo de falla (Mpa)	Ciclos de falla	Deformación ($\mu\epsilon$)	Energía disipada acumulada (J/m ³)
------	---------------	----------------	---------------	----------------------------	-----------------------------	--------------------	----------------------------------	---

1	64.1	51.6	380	1293.3	639.1	242245	500	16486.6
2	63.9	50.6	380	1688	835.4	701087	450	38706.9
3	65.9	50.6	380	1301.1	648.5	2320000	400	128648.6
4	64	50.8	380	1450.2	701.3	1502300	430	94507.2
5	64.2	51	380	1375	684.5	980000	440	68320.1
6	64.4	50.9	380	1602.4	765	1208900	420	81442.8
7	63.8	51.1	380	1540.8	721.2	890050	460	56990.3
8	64.5	51.3	380	1401.6	658.9	330420	490	22804.7
9	64.3	50.7	380	1333.7	645.5	268100	495	19404.2
10	64.1	51.5	380	1700.1	812.4	1750000	405	102315
11	63.7	51.2	380	1578	780.3	1330700	435	76584.3
12	64.6	50.8	380	1499.9	732.2	1080000	445	62990.8
13	65	51.1	380	1625.4	790.6	1600000	415	89650.7
14	64.7	51	380	1444.8	705	530000	475	33404.9
15	64.9	50.9	380	1389	670.7	460000	480	28901.5
16	65.1	51.3	380	1311.6	643.3	295000	485	21344.8
17	63.9	51.4	380	1692.5	822.6	1950000	410	110742.6
18	64.8	50.6	380	1487	718.9	790000	455	51648.2
19	64.0.0	50.8	380	1344.4	652.1	360100	492	24901.7
20	64.2	51.2	380	1550.3	760	1250000	425	83279.3

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Tabla 42

Datos de Estadísticos de Resistencia a la Fatiga

Medida Estadística	Ciclos de Falla	Deformación (uε)
N (Cantidad de datos)	20	20
Promedio (Media)	991,945	450.35
Desviación Estándar	614,023	32.76
Mínimo	242,245	400
Percentil 25	435,025	423.75
Mediana (Percentil 50)	935,025	447.5
Percentil 75	1,373,600	481.25

Máximo	2,320,000	500
---------------	-----------	-----

Nota. Fuente: Elaboración Propia

El coeficiente de correlación de Pearson (r) para las variables "Ciclos de falla" y "Deformación (uE)" es aproximadamente -0.61.

4.8.4.1 Interpretación de la Correlación. Este valor indica una correlación negativa moderada entre el numero de ciclos de falla y la deformación

A. **Relación Negativa (-):** Esto significa que las dos variables tienden a moverse en direcciones opuestas. En términos prácticos, a medida que el número de ciclos de falla aumenta, la deformación tiende a disminuir. Inversamente, a menores ciclos de falla, se observa una mayor deformación.

B. **Fuerza Moderada (0.61):** El valor de 0.61 (ignorando el signo) sugiere que la relación lineal entre las variables no es ni muy fuerte ni muy débil; es moderada. Esto implica que, si bien hay una tendencia clara, existen otros factores que también influyen en la deformación o los ciclos de falla. No todos los puntos de datos se alinean perfectamente en una línea recta.

En resumen, los datos sugieren que las muestras que soportan una mayor cantidad de ciclos antes de fallar tienden a exhibir una menor deformación, y viceversa.

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. En los resultados de los ensayos para los materiales de la mezcla asfáltica se definió, que en el agregado grueso tanto para el TM -3/4" y el TM-1/2", en agregado fino como arena chancada y zarandeada, además el diseño de ligantes asfálticos PG76-10 han cumplidos los parámetros técnicos establecidos el Manual de Especificaciones técnicas para carreteras EG-2013, como lo indica en los siguientes resultados:

5.2. El agregado grueso empleado en esta investigación proviene de la cantera Fernández, ubicada en el Km 149+110 de la Ruta PE-1N, cuyo acceso de 18 km en afirmado se encuentra en condiciones adecuadas. Este material fue triturado al 100% mediante planta chancadora, cumpliendo con la clasificación exigida por el Manual EG-2013. Según la Tabla 21, para la granulometría TM - 3/4" se obtuvo 100% de pasante en 3/4", 50.9% en 1/2" y 3.3% en 3/8". Estos resultados reflejan una distribución progresiva de tamaños. Para el tamiz TM - 1/2", la gradación fue 100% de pasante en 1/2", 73.8% en 3/8", 20.8% en 1/4" y 6.8% en la malla #4, conforme a los límites establecidos en la Tabla 22. Los ensayos técnicos realizados confirman el cumplimiento normativo. La abrasión Los Ángeles fue de 17% (máximo permitido: 40%) y la pérdida por sulfato de magnesio fue de 6.6% (máximo: 18%). El índice de durabilidad alcanzó 84%, superando el mínimo de 35%, lo que evidencia resistencia al desgaste y a condiciones climáticas adversas. Estos valores confirman la calidad estructural del agregado grueso frente a cargas cíclicas y exposición ambiental. Diversas investigaciones han evidenciado que, más allá del método y la energía de compactación, las características físicas y químicas de los agregados como su tamaño, forma, textura y orientación ejercen una influencia determinante en la microestructura de la mezcla asfáltica, afectando directamente su comportamiento mecánico y su desempeño global (Busang & Maina, 2022). Respecto su forma, el contenido de partículas chatas y alargadas fue de solo 3.1% (máximo: 10%), y las

caras fracturadas alcanzaron 100% con una cara y 98.4% con dos, superando los mínimos de 85% y 50%. El contenido de sales solubles fue 0.089% (máx. 0.50%) y la adherencia al ligante fue superior al 95%. La absorción de agua fue de 1.02%, exactamente en el límite permitido, lo que sugiere un monitoreo cuidadoso en aplicaciones futuras. En conjunto, todos los parámetros cumplen los requisitos del EG-2013. La presencia de partículas alargadas y escamosas reduce el rendimiento de la mezcla asfáltica, ya que tienden a fracturarse durante su fabricación y colocación, afectando negativamente la durabilidad del pavimento. En contraste, se requiere que el agregado posea suficiente resistencia para soportar las cargas inducidas por el tránsito, siendo preferibles las partículas angulares y de superficie rugosa frente a aquellas redondeadas y lisas (Hassan et al., 2021).

5.3. Para el agregado fino tipo arena chancada, mostrada en la Tabla 24. Se obtuvo un 100% de pasante en la malla 3/8", 97.4% en la #4, y 71.5% en la #8, con una disminución progresiva hasta alcanzar 9.1% en la #200. Esta distribución refleja una curva granulométrica continua y balanceada. Tal comportamiento es favorable para lograr una adecuada compactación en la mezcla. En la arena zarandeada también presenta una distribución granulométrica aceptable, según la Tabla 25. Se registró 100% de pasante en 3/8", 88.4% en #8, 59.5% en #16 y 3.9% en la malla #200. Esta gradación más cerrada mejora el llenado de vacíos y contribuye a la trabajabilidad de la mezcla. Su inclusión es importante para afinar la textura y optimizar la densidad del material. La combinación empleada en el diseño MAC-2, detallada en la Tabla 27, incluyó 15% de piedra chancada 3/4", 35% de 1/2", 35% de arena chancada, 14.5% de arena zarandeada y 0.5% de filler. Esta proporción fue seleccionada para alcanzar una distribución granulométrica óptima. Los resultados de vacíos evidenciaron una estructura granular densa. Lo anterior asegura un esqueleto resistente y estable en la mezcla. Se ha demostrado que incluso las mezclas asfálticas elaboradas con materiales de alta calidad pueden

presentar fallas si no se garantiza una distribución adecuada de las partículas del agregado, lo que resalta la importancia de una gradación óptima para el desempeño estructural (Stakston & Bahia, 2003). Y la curva granulométrica resultante, presentada en la Figura 16, confirma el cumplimiento con las especificaciones del HUSO D5 (ASTM D3515). La mezcla se mantiene dentro de los límites del MAC-2, asegurando una transición continua entre tamaños de partícula. Se ha identificado que el volumen entre partículas de agregado grueso influye significativamente en la resistencia al agrietamiento de la mezcla, y que no basta con una buena estructura del agregado grueso, sino que también es clave el rol del mortero de agregado fino que llena esos espacios (Yan et al., 2023).

5.4. Para el asfáltico modificado PG 76-10 fue seleccionado en función de las condiciones climáticas de la zona, cumpliendo con las especificaciones establecidas en el Manual EG-2013 del MTC para mezclas asfálticas en caliente. Como se detalla en la Tabla 28, las propiedades físicas evaluadas indicaron una penetración de 45 dmm, un punto de ablandamiento de 63 °C y una viscosidad cinemática de 1649 cSt, todos dentro de los límites definidos para un ligante de tipo ID. Estos valores garantizan una resistencia adecuada al flujo plástico y una buena manejabilidad durante las fases de mezcla y compactación. Debido a que la calidad del ligante asfáltico es clave para el rendimiento del pavimento, y la modificación con polímeros se ha consolidado como una técnica eficaz para mejorar su comportamiento a altas temperaturas (Y. Wang et al., 2017). El comportamiento reológico del ligante fue evaluado utilizando el método Superpave, cuyos resultados se presentan en la Tabla 29. El valor de $G^*/\sin \delta$ fue de 78 kPa a 70 °C, superando el mínimo requerido de 60 kPa, mientras que tras el envejecimiento con RTFO, el valor alcanzó 6.77 kPa, por encima del mínimo de 2.20 kPa. Además, la carta de viscosidad reveló un rango óptimo de temperatura de 163.5 °C a 168 °C para el mezclado y de 156.5 °C a 160 °C para la compactación. Los resultados respaldan la idoneidad del ligante PG 76-10 modificado con SBS y aditivo de adherencia para condiciones de alta temperatura y

tráfico intenso y mejora a creces el rendimiento y la durabilidad del pavimento asfáltico gracias a sus propiedades superiores (Huang et al., 2024).

5.5. Referente para el ensayo de diseño Marshal en una mezcla asfáltica la determinación del contenido óptimo de ligante, se evaluaron mezclas asfálticas modificadas con polímero SBS, variando el contenido de asfalto entre 4.5% y 6.5% en incrementos de 0.5%. Los resultados obtenidos evidenciaron una tendencia creciente en la estabilidad Marshall a medida que se incrementaba el porcentaje de ligante. Específicamente, con un 4.5% de asfalto se alcanzó una estabilidad de 1778 kg, mientras que con un 6.0% se obtuvo el valor máximo de 2018 kg. Este comportamiento se atribuye a la mejora en las propiedades termo-reológicas del ligante, resultado del incremento en su viscosidad inducido por la modificación con SBS, lo que a su vez genera una mayor rigidez y resistencia al esfuerzo (Jasim & Ismael, 2021). En relación con el flujo Marshall, también se observó un incremento progresivo, pasando de 7.3 (0.01 in) con un 4.5% de ligante a 14.7 (0.01 in) con un 6.5%, evidenciando una mayor capacidad de deformación. La adición de SBS al asfalto no solo aumenta su viscosidad, sino que reduce la absorción por parte de los agregados, incrementando así el contenido de ligante libre en la mezcla, lo cual favorece la cohesión interna (Pasandín et al., 2016). Los parámetros Marshall obtenidos para el contenido óptimo de ligante cumplieron con los requisitos técnicos establecidos por la normativa MTC E 504. En cuanto al peso unitario, se registró un rango entre 2.25 y 2.33 g/cm³, mostrando una correlación positiva con el aumento del contenido de asfalto. Por otro lado, los vacíos de aire (A.V.) presentaron una tendencia decreciente, disminuyendo desde un 8.1% con 4.5% de ligante hasta un 1.6% con 6.5%. El intervalo óptimo se identificó entre 5.5% y 6.0%, con vacíos del 4.4% y 3.2%, respectivamente. De igual modo, el porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA) mostró un incremento progresivo desde el 53.3% hasta alcanzar el 89.9% con el contenido más alto de ligante. Contrariamente, el volumen de vacíos minerales en el agregado (VMA) disminuyó levemente al aumentar el contenido de asfalto,

pero se mantuvo por encima del valor mínimo normativo, variando entre 16.1% y 17.3%. Con base en estos resultados, se determinó que el contenido óptimo de asfalto PG76-10 modificado es del 5.7%, valor superior al de mezclas convencionales debido al uso del modificador polimérico SBS, que incrementa la viscosidad del ligante y, en consecuencia, la demanda de asfalto. A esta dosificación, la mezcla cumple con todos los parámetros especificados en la norma MTC E 504, aplicando 75 golpes de compactación por cara con el martillo Marshall. Los valores correspondientes son: peso unitario de 2.298 g/cm³, vacíos de aire de 4.1%, VMA de 16.6%, VFA de 75.3%, estabilidad de 1935 kg, flujo de 9.33 (0.01 in), y una relación polvo/asfalto efectivo de 0.78.

5.6. Para el ensayo de la tracción indirecta (ITS), Según los datos presentados en la Tabla 40, la mezcla asfáltica formulada con ligante PG76-10 modificado con polímero SBS y aditivo de adherencia alcanzó una resistencia a la tracción indirecta (ITS) de 9.8 kg/cm² en condición seca y 8.45 kg/cm² en condición húmeda, lo que representa una reducción del 13.8 % tras ser sometida a ciclos de congelamiento y descongelamiento. Esta variación condujo a un valor de TSR del 86.5 %, el cual supera el umbral mínimo del 80 % establecido por el diseño Superpave, lo que confirma una adecuada resistencia frente al daño inducido por la humedad. La disminución de los valores de ITS en las muestras acondicionadas puede estar relacionada con la pérdida de cohesión interna debido a la presencia de humedad. No obstante, la reducida diferencia entre las condiciones evaluadas sugiere que el uso del modificador contribuyó a mejorar el desempeño de la mezcla bajo condiciones de humedad (Khan et al., 2023). Este tipo de comportamiento concuerda con hallazgos previos, que demuestran un incremento significativo en la resistencia mecánica, mayor estabilidad ante la deformación plástica y una menor sensibilidad a la humedad en mezclas asfálticas con adición de SBS (Islam et al., 2021; Singh et al., 2013).

Tabla 43

Resumen del resultado de daño por humedad de la mezcla asfáltica modificada con polímeros SBS y aditivo de adherencia

Mezcla	Carga de tracción indirecta seco (kg/cm ²)	Carga de tracción indirecta húmeda (kg/cm ²)	TSR (%)	Requerimiento
Ligante PG76-10 modificado con polímero SBS y aditivo de adherencia	9.80	8.45	86.5	>80

Nota. Fuente: Elaboración Propia

5.7. Para el ensayo de La prueba de Huella de Rueda de Hamburgo (HWT) constituye una metodología fundamental para evaluar la resistencia al ahuellamiento en mezclas de concreto asfáltico, al replicar las condiciones de carga cíclica y presencia de humedad (J. Kim et al., 2024). En este estudio, la mezcla elaborada con ligante PG76-10, modificado con polímero SBS y aditivo de adherencia, registró una deformación máxima de 4.45 mm tras 20 000 pasadas, situándose por debajo del umbral de 12.5 mm establecido por la norma AASHTO T 324 (Aashto, 2014), como se muestra en la Tabla 42. Este resultado evidencia un comportamiento favorable frente a la deformación plástica. En consecuencia, se infiere que la adición de polímero SBS junto con el aditivo de adherencia contribuye de forma significativa a mejorar la resistencia al ahuellamiento en comparación con mezclas no modificadas.

Tabla 44

Resultados del ensayo de rueda cargada de Hamburgo

Mezcla asfáltica	Nº de pasadas	Profundidad de huella (mm)
Ligante PG76-10 modificado con polímero SBS y aditivo de adherencia	20000	4.45

Nota. Fuente: Elaboración Propia

5.8. En términos generales, una mezcla asfáltica que presenta un elevado módulo resiliente suele asociarse con una mayor resistencia a las deformaciones permanentes. La Tabla 41. expone los resultados del ensayo de módulo resiliente a temperaturas de 20 y 40 °C, aplicados a mezclas fabricadas con ligante PG76-10 modificado con polímero SBS y aditivo de adherencia. Los datos revelan una disminución del 77.9 % en el módulo resiliente, del 68.2 % en la fuerza de carga y un incremento del 43.6 % en la deformación a medida que aumenta la temperatura. Esta tendencia es coherente con el comportamiento viscoelástico característico de los materiales bituminosos, cuya rigidez disminuye ante elevadas temperaturas y cargas prolongadas (Mohamed et al., 2021). Asimismo, la interacción entre el ligante modificado y los aditivos puede afectar significativamente las propiedades del compuesto, siendo susceptible a deteriorarse con el incremento térmico (Arabani & Faramarzi, 2015). Se observa que la mayor mejora en el módulo resiliente y su tasa de crecimiento se produce a 20 °C, lo que sugiere que la mezcla adquiere su máxima rigidez bajo condiciones de deformación elástica. Según lo indicado en la guía AASHTO 1993, un mayor módulo resiliente permite optimizar el diseño estructural de los pavimentos, posibilitando secciones más delgadas sin comprometer su desempeño, lo cual, aunque la normativa ha sido actualizada, sigue siendo un criterio útil para el análisis mecánico de las mezclas (Mills-Beale & You, 2010).

Tabla 45

Resumen de resultados del ensayo de módulo resiliente (elasticidad)

Mezcla asfáltica	Temperatura (°)	Ensayo	Módulo resiliente (Mpa)	Fuerza máxima de carga (N)	Def. recuperable total (mm)
Ligante PG76-10 modificado con polímero SBS y aditivo de adherencia	20	Promedio	6713	4994.4	7.34
		Desv. Stand	31.6	5.61	0.04
		CV %	0.47	0.11	0.54
	40	Promedio	1485	1586.2	10.54
		Desv. Stand	19	10.23	0.07
		CV %	1.28	0.64	0.66

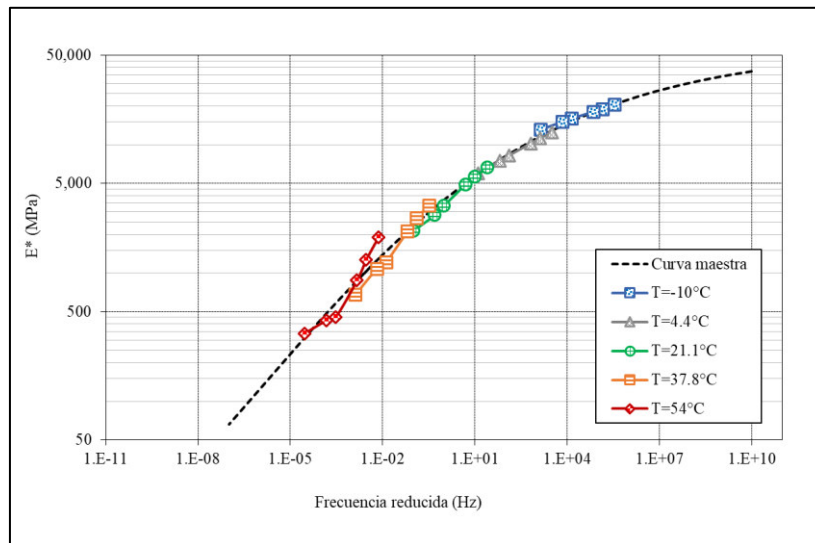
Nota. Fuente: Elaboración Propia

5.9. En el ensayo del módulo dinámico ilustra la construcción de la curva maestra (ver figura 23), evidenciando cómo la aplicación de factores de desplazamiento ha permitido ampliar el rango de análisis experimental y predecir con mayor precisión la tendencia del módulo dinámico en un espectro más amplio de condiciones. Estas curvas se obtuvieron ajustando los datos experimentales a un modelo sigmoideal, incorporando factores de desplazamiento térmico tipo Arrhenius, conforme a lo establecido en la norma AASHTO TP 62. Inicialmente, se adoptó una temperatura de referencia de 21 °C, a partir de la cual se aplicaron manualmente los factores de desplazamiento térmico (aT) para superponer las curvas isócronas y obtener una curva maestra unificada del módulo dinámico para cada mezcla. Durante este proceso, se emplearon herramientas gráficas para identificar y eliminar valores atípicos (Vestena et al., 2021). Con el fin de facilitar la interpretación, el dominio de frecuencia de la curva maestra se dividió arbitrariamente en tres regiones. En la zona de baja frecuencia (1×10^{-8} a 1×10^{-2} Hz), se observó una pendiente pronunciada, indicando una elevada sensibilidad del módulo dinámico E^* ante variaciones de frecuencia en condiciones de carga lenta o temperaturas elevadas. En el intervalo medio (1×10^{-2} a 1×10^3 Hz), la pendiente disminuyó progresivamente, reflejando una transición hacia una mayor rigidez del material. Finalmente, en la región de alta frecuencia (por encima de 1×10^3 Hz), la pendiente tendió a estabilizarse, evidenciando una menor sensibilidad del módulo dinámico, comportamiento asociado a temperaturas bajas o cargas rápidas, donde el material presenta una respuesta predominantemente elástica (Rahman & Tarefder, 2016). Diversas investigaciones han demostrado que el uso de asfaltos modificados con un mayor grado de desempeño (PG76-22), frente a asfaltos no modificados (PG64-22), mejora sustancialmente el comportamiento mecánico de la mezcla, especialmente en términos del módulo dinámico (E^*), el cual está directamente relacionado con el módulo complejo del ligante (Saady et al., 2024). En asfaltos modificados con polímeros (PMB), el módulo complejo es menor que el del asfalto virgen a

altas frecuencias (bajas temperaturas) y mayor a bajas frecuencias (altas temperaturas), debido a que el polímero confiere mayor flexibilidad al ligante a bajas temperaturas y forma una red estructural que aporta elasticidad a altas temperaturas (Chen et al., 2023).

Figura 31

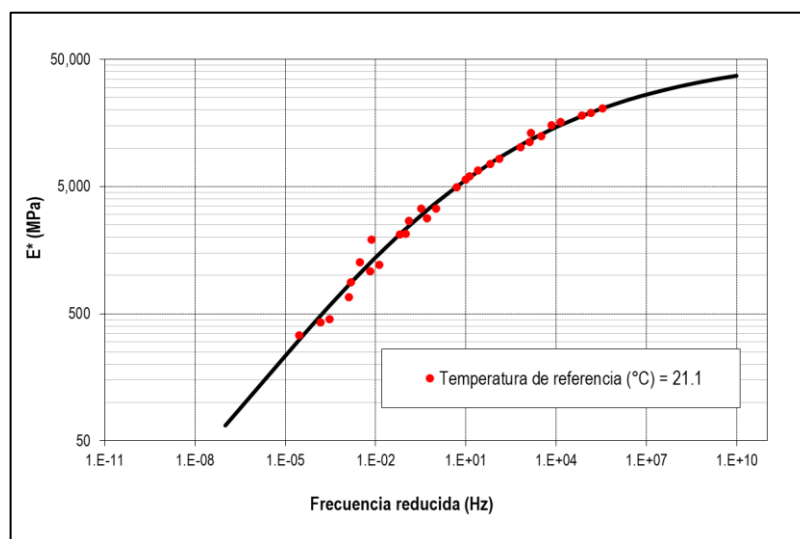
Parámetros de curva maestra de Modulo dinámico (E^) vs Frecuencia Reducida (Hz)*



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Figura 32

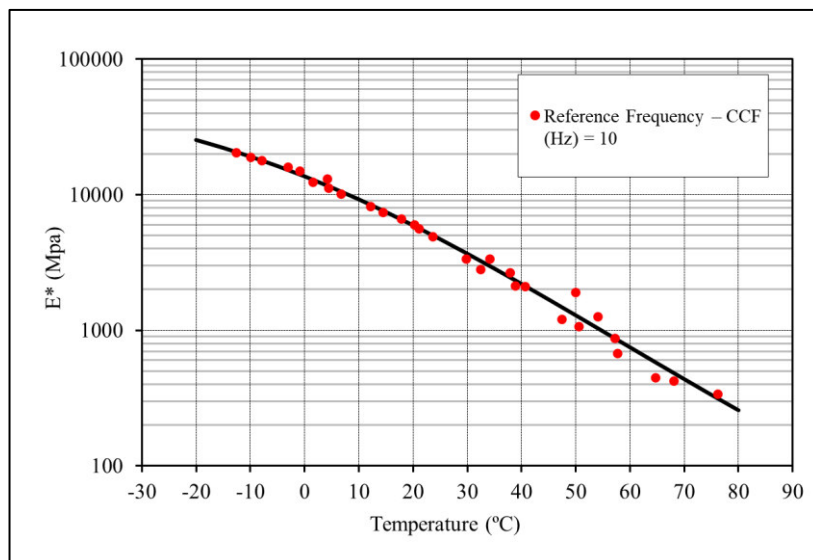
Construcción de la Curva Maestra General



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Figura 33

Parámetros de curva maestra de Modulo dinámico (E^) vs Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)*



Nota. Fuente: Elaboración Propia

5.10. Los resultados de la prueba de fatiga de 4 puntos de las mezclas asfálticas se resumen en la Tabla 43. Se observa que una disminución en el nivel de microdeformación aplicada produce un incremento significativo en la vida a fatiga de la mezcla, lo que concuerda con el comportamiento típico de materiales viscoelásticos sometidos a cargas cíclicas. En concreto, la mezcla sometida a $400\ \mu\epsilon$ alcanzó 2.32 millones de ciclos antes de la falla, mientras que aquella expuesta a $500\ \mu\epsilon$ falló a menos de 242245 ciclos, lo que demuestra una mejora sustancial en la resistencia a la fatiga bajo menores niveles de deformación. En la Figura 25 se empleó la ecuación de fatiga para modelar la correlación entre la deformación aplicada y el número de ciclos necesarios para alcanzar la ruptura. Los parámetros obtenidos, $A = 1479.2$ y $B = 0.082$, junto con un coeficiente de correlación $R^2=0.999$, indican un ajuste altamente confiable del modelo. En este caso, el parámetro A refleja la magnitud de la resistencia a la fatiga, mientras que B representa la sensibilidad del material frente a los distintos niveles de deformación (W. Wang et al., 2022). De acuerdo con la ecuación ajustada, el valor de ϵ_6 , correspondiente a la deformación al millón de ciclos, fue de $434\ \mu\epsilon$, lo cual evidencia la

adecuada resistencia estructural de la mezcla ante cargas repetidas de intensidad moderada. En general, se considera más favorable que un modelo de fatiga presente una pendiente reducida, ya que ello indica una menor susceptibilidad de la mezcla a la acumulación progresiva de daño por deformación (Foroutan Mirhosseini et al., 2019). En este sentido, la línea de regresión ajustada para la mezcla evaluada exhibe una pendiente relativamente baja, lo que indica una respuesta favorable ante la fatiga producida por cargas cíclicas.

Tabla 46

Resumen del ensayo de fatiga en vigas de cuatro puntos para la mezcla asfáltica bajo diferentes niveles de microdeformación

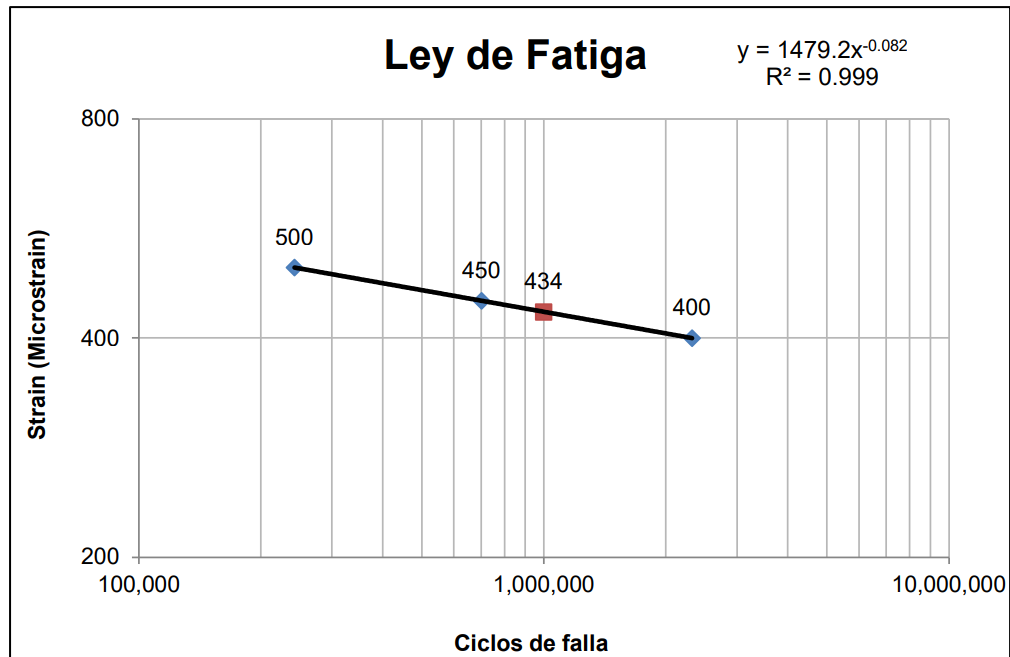
Viga	Ancho (mm)	Altura (mm)	Largo (mm)	Módulo inicial (Mpa)	Módulo de falla (Mpa)	Ciclos de falla	Deformación (µε)	Energía disipada acumulada (J/m ³)
1	64.1	51.6	380	1293.3	639.1	242,245	500	16486.6
2	63.9	50.6	380	1688	835.4	701,087	450	38706.9
3	65.9	50.6	380	1301.1	648.5	2,320,000	400	128648.6
4	64.0	50.8	380	1450.2	701.3	1,502,300	430	94,507.20
5	64.2	51.0	380	1375.0	684.5	980,000	440	68,320.10
6	64.4	50.9	380	1602.4	765.0	1,208,900	420	81,442.80
7	63.8	51.1	380	1540.8	721.2	890,050	460	56,990.30
8	64.5	51.3	380	1401.6	658.9	330,420	490	22,804.70
9	64.3	50.7	380	1333.7	645.5	268,100	495	19,404.20
10	64.1	51.5	380	1700.1	812.4	1,750,000	405	102,315.00
11	63.7	51.2	380	1578.0	780.3	1,330,700	435	76,584.30
12	64.6	50.8	380	1499.9	732.2	1,080,000	445	62,990.80
13	65.0	51.1	380	1625.4	790.6	1,600,000	415	89,650.70
14	64.7	51.0	380	1444.8	705.0	530,000	475	33,404.90
15	64.9	50.9	380	1389.0	670.7	460,000	480	28,901.50
16	65.1	51.3	380	1311.6	643.3	295,000	485	21,344.80
17	63.9	51.4	380	1692.5	822.6	1,950,000	410	110,742.60

18	64.8	50.6	380	1487.0	718.9	790,000	455	51,648.20
19	64.0.0	50.8	380	1344.4	652.1	360,100	492	24,901.70
20	64.2	51.2	380	1550.3	760.0	1,250,000	425	83,279.30

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Figura 34

Parámetros del modelo de fatiga $\varepsilon = A \cdot N_f^{-B}$ y valor de ε_6 para la mezcla evaluada.



Nota. Fuente: Elaboración Propia

VI. CONCLUSIONES

6.1. Según los hallazgos obtenidos en este estudio, se puede afirmar que al añadir polímeros SBS en una proporción del 3% y un aditivo adherente del 0.5% al diseño de la mezcla asfáltica, se produce una mejora sustancial en las características mecánicas y operativas, tales como la flexibilidad, la resistencia a la deformación por carga y la resistencia a la fatiga. Esta dosificación asegura que el ligante alcance la clasificación PG 76-10, optimizando su desempeño bajo condiciones térmicas y de carga exigentes. Además, se alinea con estudios previos que respaldan su efectividad en mezclas asfálticas modificadas. Durante el análisis de estabilidad Marshall, se observó un incremento constante a medida que se aumentaba la cantidad de aglomerante asfáltico, logrando una estabilidad de 1778 kg con un porcentaje de asfalto del 4.5% y alcanzando un máximo de 2018 kg con un 6.0% de asfalto. El flujo Marshall aumentó progresivamente de 7.3 mm con un 4.5% de ligante a 14.7 mm con un 6.5%, lo que indica una mayor capacidad de deformación con el incremento del contenido de asfalto. Además, su óptimo contenido de asfalto es 5.7%, la mezcla asfáltica modificada con SBS cumplió con todos los requisitos de la normativa MTC E 504, mostrando valores satisfactorios en los parámetros Marshall. Esto incluyó un peso unitario de 2.298 g/cm³, un flujo de 9.33 mm, una estabilidad de 1935 kg, y un VFA de 75.3%, lo que valida el diseño como adecuado para su uso en pavimentos asfálticos.

6.2. Al agregar polímeros SBS y un aditivo para mejorar la adherencia al ligante asfáltico PG76-10, se observó un incremento notable en la deformación permanente por huellas con la prueba de la rueda Hamburgo, luego de 20,000 ciclos específicos en el ensayo T234, obteniendo un valor de 4.45 mm, estando por debajo de los parámetros especificado que es 12.00mm. Comprendiendo que niveles de polímero SBS que exceden el 4.5% requerirían una mayor rigidez en la mezcla, lo cual podría desencadenar una fractura o fisuras en etapas tempranas. En consecuencia, las tasas por debajo del 3.5% cumplirían con los límites

establecidos. Asimismo, se admite que, según la información recopilada previamente, este estudio podría realizarse con una cantidad de ciclos de carga que varíen de 7000 a 10,000, lo que daría lugar a índices por debajo del 3.5% en el material polimérico SBS.

6.3. La presencia de SBS y aditivos adherentes mejora notablemente la capacidad elástica de la mezcla asfáltica, reflejándose en valores altos del módulo resiliente, especialmente a temperaturas de 20 y 40 °C. teniendo un valor promedio a 20°C de 6713 Mpa y 4994.4 N y un valor promedio a 40°C de 1485 Mpa y 1586.2N, lo cual los datos revelan una disminución del 77.9% del módulo resiliente y del 68.2% en la fuerza de carga en temperaturas altas de 40°C en la mezcla asfáltica modificada.

6.4. La incorporación de polímeros SBS y aditivo de adherencia en la mezcla asfáltica modificada, se puede apreciar una mejora a la resistencia a la Elasticidad con valores elevados de modulo dinámico $|E^*|$, además se pudo observar que a incrementar la temperatura a 54°C el módulo disminuye notablemente a 451Mpa a 1Hz, mientras aumentamos la frecuencia a 25Hz con la misma temperatura tenemos un resultado de 1901Mpa La curva maestra del módulo dinámico construida a 21,1 °C muestra un comportamiento viscoelástico típico, con alta sensibilidad a temperaturas elevadas y carga lenta, además una marcada rigidez bajo condiciones de alta frecuencia. Este patrón sugiere que la mezcla modificada con PG76-10 con polímero SBS y aditivo de adherencia ofrece un excelente desempeño estructural en climas fríos o ante tránsito rápido, lo que la hace adecuada para pavimentos de alto rendimiento.

6.5. La incorporación de polímeros SBS y aditivos de adherencia en la mezcla asfáltica modificada mostró un efecto positivo en la resistencia a la fatiga bajo condiciones de deformación controlada. El ensayo a flexión revela que una microdeformación de 400 $\mu\epsilon$ permite a la mezcla alcanzar una vida útil de aproximadamente 2.32 millones de ciclos, lo que demuestra una mejora significativa frente a cargas repetidas. El modelo de fatiga ajustado ($R^2=0.999$) presenta parámetros $A=1479.2$ y $B=0.082$, reflejando una alta capacidad de

resistencia a cargas repetitivas y una baja sensibilidad a la deformación. El valor de $434 \mu\epsilon$ respalda la eficacia del sistema modificador al mantener la integridad estructural de la mezcla durante un millón de ciclos. La pendiente reducida del modelo sugiere, además, una menor susceptibilidad a la acumulación progresiva de daño, lo que confirma el buen desempeño del ligante modificado con polímero SBS y aditivo de adherencia frente a la fatiga.

VII. RECOMENDACIONES

7.1. Es necesario llevar a cabo más investigaciones en mezclas asfálticas que contienen polímeros y que han sido sometidas a pruebas exhaustivas de rendimiento. Se debe considerar y mencionar los resultados obtenidos en este estudio, así como analizar otras variables como los distintos tipos de polímeros utilizados en la mezcla asfáltica., con productos naturales disponibles en el territorio peruano, utilizando polímeros biodegradables como la presencia de lignina en las diferentes concentraciones indicadas en los reglamentos técnicos internacionales en vigor posibilitaría la precisa identificación de los niveles ideales de polímeros en una combinación con el fin de satisfacer los variados requisitos especificados en relación a los agregados.

7.2. Se sugiere implementar métodos de caracterización más avanzados del ligante asfáltico, con el propósito de garantizar un intervalo térmico adecuado que abarque toda la vida útil del pavimento. En este sentido, se recomienda realizar ensayos como el módulo complejo (G), el ángulo de fase (δ), la viscosidad compleja (η^*), así como pruebas de fluencia (creep) que evalúen la deformación en función del tiempo y ensayos para simular el envejecimiento anticipado del material, entre otros.

7.3. Se recomienda la colaboración de más institutos de investigación en las universitarias públicas y privada, equipando con tecnología avanzada en pavimentos, Con el propósito de estudiar las distintas categorías de polímeros asfálticos. Actualmente, se está notando una inclinación hacia la optimización de las características reológicas. También, se han llevado a cabo amplias investigaciones acerca de los polímeros SBS y de materiales como la lignina, entre otros. No obstante, a nivel mundial, el uso de los plastómeros como polímeros es poco común. Hay una variedad de opciones en cuanto a polímeros para modificar las características reológicas del betún y favorecer el avance de la infraestructura vial del país. Al llevar a cabo la construcción de carreteras con asfalto caliente, es esencial asegurar una durabilidad

prolongada y una resistencia óptima a la fatiga y al deterioro por huellas, que son los inconvenientes más comunes en nuestras vías. Considerando que las alteraciones en los polímeros del asfalto deben garantizar precios competitivos del asfalto, sin generar un aumento desmesurado en los gastos de capital, con la meta de asegurar la competitividad a largo plazo en cuanto a la operación y el mantenimiento.

7.4. Es esencial dedicar una atención detallada y completa al momento de seleccionar y evaluar la calidad de los materiales pétreos empleados en la creación de las mezclas asfálticas, ya que tienen un rol fundamental en la estructura y desempeño de dichas mezclas. Es fundamental considerar que la capacidad de estos materiales para resistir las fuerzas externas está directamente relacionada con su durabilidad y desempeño a lo largo del tiempo.

7.5. Al incorporar polímeros SBS de alta calidad y un aditivo especial diseñado para mejorar la adherencia entre los componentes, se consigue un significativo incremento en la resistencia a la deformación elástica en la mezcla asfáltica modificada, lo cual se traduce en la obtención de un elevado módulo resiliente. Los resultados obtenidos en el estudio muestran un incremento significativo en comparación con los datos anteriores.

VIII. REFERENCIAS

- AASHTO, T. (2014). 283; Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Aashto, T. (2014). 324, Hamburg Wheel-Track Testing of compacted Hot Mix Asphalt (HMA). AASHTO.
- Abed, M. A., Al-Tameemi, A. F., Abed, A. H., & Wang, Y. (2022). Direct tensile test evaluation and characterization for mechanical and rheological properties of polymer modified hot mix asphalt concrete. *Polymer Composites*, 43(9). <https://doi.org/10.1002/pc.26949>
- Alsolieman, H. A., Babalghaith, A. M., Memon, Z. A., Al-Suhaibani, A. S., & Milad, A. (2021). Evaluation and Comparison of Mechanical Properties of Polymer-Modified Asphalt Mixtures. *Polymers*, 13(14), 2282. <https://doi.org/10.3390/polym13142282>
- Arabani, M., & Faramarzi, M. (2015). Characterization of CNTs-modified HMA's mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 83, 207-215.
- Busang, S., & Maina, J. (2022). Influence of aggregates properties on microstructural properties and mechanical performance of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 318, 126002. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126002>
- Cajina Cruz, N. A., Baldi, A., Camacho Garita, E., & Aguiar Moya, J. P. (2021). Evaluación de desempeño de la mezcla asfáltica modificada con residuos de PVC tipo blíster. *Infraestructura Vial*, 23(42). <https://doi.org/10.15517/iv.v23i42.44688>
- César Torres, A. G., & Cedeño, M. (2024). Implementación de metodología de evaluación por desempeño para mezclas asfálticas en Panamá. *I+D Tecnológico*, 20(1).

<https://doi.org/10.33412/idt.v20.1.3865>

- Chen, H., Saba, R. G., Liu, G., Barbieri, D. M., Zhang, X., & Hoff, I. (2023). Influence of material factors on the determination of dynamic moduli and associated prediction models for different types of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 365, 130134. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130134>
- Gupta, A. (2022). Estudio para la mejora de mezclas asfálticas porosas con una selección multicriterio de aditivos y un nuevo betún modificado con polímeros [Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria]. Repositorio Institucional UC. <https://doi.org/10.35537/10915/154698>
- Hamid, A., Baaj, H., & El-Hakim, M. (2022). Rutting Behaviour of Geopolymer and Styrene Butadiene Styrene-Modified Asphalt Binder. *Polymers*, 14(14), Article 14. <https://doi.org/10.3390/polym14142780>
- Hassan, H. M. Z., Wu, K., Huang, W., Chen, S., Zhang, Q., Xie, J., & Cai, X. (2021). Study on the influence of aggregate strength and shape on the performance of asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 294, 123599. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123599>
- Huang, J., Yan, K., Wang, M., Shi, K., Li, Y., & Zhang, Y. (2024). Performance evaluation of SBS-modified asphalt mixtures incorporating waste tire rubber and HDPE. *Construction and Building Materials*, 430, 136423. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136423>
- Islam, S. S., Singh, S. K., Ransinchung R.N., G. D., & Ravindranath, S. S. (2021). Effect of property deterioration in SBS modified binders during storage on the performance of asphalt mix. *Construction and Building Materials*, 272, 121644. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121644>

- Jasim, S. A., & Ismael, M. Q. (2021). Marshall Performance and Volumetric Properties of Styrene-Butadiene-Styrene Modified Asphalt Mixtures. *Civil Engineering Journal*, 7(6), Article 6. <https://doi.org/10.28991/cej-2021-03091709>
- Khan, I., Khattak, A. W., Bahrami, A., Khattak, S., & Ejaz, A. (2023). Engineering Characteristics of SBS/Nano-Silica-Modified Hot Mix Asphalt Mixtures and Modeling Techniques for Rutting. *Buildings*, 13(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/buildings13092352>
- Kim, J., Kim, K., & Le, T. H. M. (2024). Optimizing Rural Pavements with SBS-Modified Asphalt Binders and Petroleum Resin. *Buildings*, 14(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/buildings14010116>
- Kim, K.-N., & Le, T. H. M. (2023). Durability of Polymer-Modified Asphalt Mixture with Wasted Tire Powder and Epoxy Resin under Tropical Climate Curing Conditions. *Polymers*, 15(11), 2504. <https://doi.org/10.3390/polym15112504>
- Lara-Ruiz, J. J. (2021). Evaluación de métodos indirectos para la determinación de módulo dinámico de mezclas asfálticas [Tesis de Maestría, Universidad del Norte]. Repositorio Institucional UN. <https://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/10309>
- Loría-Salazar, L., Cuadrado-Valbuena, J., Villegas-Villegas, R., & Castillo-Camarena, E. (2024). Introducción a los Cementos y Ligantes Asfálticos: Caracterización, Reología y Producción. *Panamá Asfaltos Modificados*. <https://doi.org/10.15517/ring.v20i1-2.7267>
- Lozano, E., & Laguado, O. (2021). Evaluación de las propiedades físicas de un asfalto 60/70 modificado con GCR y nanoarcilla [Tesis de Maestría, Universidad Santo Tomás]. Repositorio Institucional UST. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/34674>

- Lv, Q., Huang, W., Sadek, H., Xiao, F., & Yan, C. (2019). Investigation of the rutting performance of various modified asphalt mixtures using the Hamburg Wheel-Tracking Device test and Multiple Stress Creep Recovery test. *Construction and Building Materials*, 206. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.015>
- Majarrés, S. (2023). Caracterización de un asfalto colombiano modificado con polímeros y evaluación del efecto en sus propiedades reológicas [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UNC. <https://doi.org/10.21142/dn.2022.3667>
- Mexicano, J. A., Hernández, G., Gutiérrez, P., & Rangel, A. E. (2015). Efecto de la composición química del asfalto en el proceso de modificación con elastómeros SBS. 44o Reunió Anual de Pavimentação – RAPv e o 18o Encontro Nacional de Conservação Rodoviária – ENACOR, Brazil., 1. <https://doi.org/10.29327/1304307.48-38>
- Mills-Beale, J., & You, Z. (2010). The mechanical properties of asphalt mixtures with recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 24(3), 230-235.
- Mohamed, A. A., Wong, S. Y., Leong, L. T., Farooqi, M. A., Jaya, R. P., Al-Saffar, Z. H., & Yaacob, H. (2021). Durability phenomena of bitumen and bituminous pavement materials. *Open Civ. Eng. J*, 15(1), 279-289. <https://doi.org/10.2174/1874149502115010279>
- Montano, I. (2022). Uso de aditivo químico de mezcla tibia para el mejoramiento del grado de compactación de carpetas modificadas con polímero [Tesis Maestría, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio Institucional URP. <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/5611>
- Ohm, B., Lee, S. Y., & Le, T. H. M. (2024). Utilizing Crushed Recycled Marble Stone Powder as a Sustainable Filler in SBS-Modified Asphalt Containing Recycled Tire Rubber.

- Polymers, 17(1), 70. <https://doi.org/10.3390/polym17010070>
- Pandey, A., Islam, S., Ransingchung, D., & Ravindranath, S. (2023). Comparing the performance of SBS and thermoplastics modified asphalt binders and asphalt mixes. *Road Materials and Pavement Design*, 24(S1). <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2180999>
- Pasandín, A. R., Pérez, I., Ramírez, A., & Cano, M. M. (2016). Moisture damage resistance of hot-mix asphalt made with paper industry wastes as filler. *Journal of Cleaner Production*, 112, 853-862. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.016>
- Quispe-Torres, G. (2022). Desempeño óptimo de una mezcla asfáltica en caliente modificada con Polímero Styrene Butadiene Styrene. Repositorio Institucional URP <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/5601>
- Rahman, A. S. M. A., & Tarefder, R. A. (2016). Dynamic modulus and phase angle of warm-mix versus hot-mix asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 126, 434-441. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.068>
- Rodríguez, W., Rivera, J., Sevillano, M., & Torres, T. (2024). Performance evaluation of Stone Mastic Asphalt (SMA) mixtures with textile waste fibres. *Construction and Building Materials*, 455, 139125. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139125>
- Rosales-Navarro, T. (2022). Mezcla asfáltica altamente modificada con polímeros elastómero termoplástico sintético para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas [Tesis de Maestría, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio Institucional URP. <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/5563>
- Saudy, M., Khedr, S., & El-Badawy, S. (2024). Fiber Elastomer Modified Asphalt for the Development of Resilient Porous Asphalt Mixtures. *Arabian Journal for Science and*

Engineering, 50, 12601–12617. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09318-6>

- Santa Cruz, D. (2023). Desempeño Mecánico de Mezclas Asfálticas en Caliente utilizando Fibras de Aramida y Poliolefina [Tesis de Maestría, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio Institucional URP. <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/6256>
- Singh, M., Kumar, P., & Maurya, M. R. (2013). Strength characteristics of SBS modified asphalt mixes with various aggregates. *Construction and Building Materials*, 41, 815-823. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.062>
- Solarte-Vanegas, N. (2022). Efecto en el módulo dinámico de la mezcla asfáltica modificada con añadido de residuos triturados de la industria cerámica [Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de València]. <https://doi.org/10.4995/THESIS/10251/185790>
- Stakston, A. D., & Bahia, H. U. (2003). The effect of fine aggregate angularity, asphalt content and performance graded asphalts on hot mix asphalt performance. Wisconsin Highway Research Program.
- Vestena, P. M., Schuster, S. L., Almeida Jr., P. O. B. D., Faccin, C., Specht, L. P., & Pereira, D. D. S. (2021). Dynamic modulus master curve construction of asphalt mixtures: Error analysis in different models and field scenarios. *Construction and Building Materials*, 301, 124343. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124343>
- Wang, H., Zhan, S., & Liu, G. (2019). The Effects of Asphalt Migration on the Dynamic Modulus of Asphalt Mixture. *Applied Sciences*, 9(13), 2747. <https://doi.org/10.3390/app9132747>
- Wang, Y., Chong, D., & Wen, Y. (2017). Quality verification of polymer-modified asphalt binder used in hot-mix asphalt pavement construction. *Construction and Building*

Materials, 150, 157-166. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.196>

Yan, Y., Zhang, H., Bekoe, M., Allen, C., Zhou, J., & Roque, R. (2023). Effects of asphalt binder type, aggregate type, and gradation characteristics on fracture properties and performance of asphalt mixtures at intermediate temperatures. *Construction and Building Materials*, 409, 133801. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133801>

Zhang, L., Wang, H., Zhang, C., & Wang, S. (2023). Laboratory testing and field application of devulcanized rubber/SBS composite modified asphalt. *Case Studies in Construction Materials*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02285>

IX. ANEXOS

ANEXO A. MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON POLÍMEROS Y ADITIVO DE ADHERENCIA, DISTRITO DE MANCORA

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	VARIABLE INDEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGIA
¿De qué manera los polímeros y aditivo Adherente mejora el desempeño de las propiedades Físico-mecánicas de una mezcla asfáltica, en el distrito de Máncora?	Determinar que polímeros y aditivo de adherencia influyen en las propiedades físico-mecánicas de mezclas asfálticas, en el distrito de Máncora	Los polímeros y aditivo de adherencia influyen en las propiedades físico-mecánicas de mezclas asfálticas, en el distrito de Máncora	- Polímeros y Aditivo de Adherencia	—	- Porcentaje de dosificación de Asfalto modificado con polímeros y aditivo de adherencia - Porcentaje de dosificación de aditivo de adherencia	METODO: Deductivo ORTIENTACIÓN: Aplicada ENFOQUE: Cuantitativo
PROBLEMAS ESPECIFICOS	OBJETIVOS ESPECIFICOS	HIPOTESIS ESPECIFICA	VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	TOMA DE DATOS: Retroelectiva
¿De qué manera los polímeros y aditivo de Adherencia influye en la resistencia al ahuellamiento de una mezcla asfáltica, en el distrito de Máncora?	Determinar que polímeros y aditivo de adherencia influyen en la resistencia al ahuellamiento de una mezcla asfáltica, distrito de Máncora.	Los polímeros y aditivo de adherencia influyen en la resistencia al ahuellamiento de una mezcla asfáltica, distrito de Máncora.	- Propiedades fisico-mecanicos de Mezclas Asfálticas Modificadas	Resistencia al Ahuellamiento	- Porcentaje de Ahuellamiento permanente	TIPO DE INVESTIGACIÓN: Descriptiva - Correlacionada - Explicativa
¿De qué manera los polímeros y aditivo de Adherencia influyen en la resistencia a la flexión elástica de una mezcla asfáltica, en el distrito de Máncora?	Determinar que polímeros y aditivo de adherencia influyen en la resistencia a la flexión elástica de una mezcla asfáltica, en el distrito de Máncora.	Los polímeros y aditivo de adherencia influyen en la resistencia a la flexión elástica de una mezcla asfáltica, en el distrito de Máncora.		Resistencia a la Flexión elástica	- Deformación y Flexión elástica	NIVEL DE INVESTIGACIÓN: Descriptivo - Relacional
¿De qué manera los polímeros y aditivo de Adherencia influyen en la resistencia a la elasticidad de una mezcla asfáltica, en el distrito de Máncora?	Determinar que polímeros y aditivo adherente influyen en la resistencia a la elasticidad de una mezcla asfáltica, en el distrito de Máncora.	Los polímeros y aditivo de adherencia influyen en la resistencia a la elasticidad de una mezcla asfáltica, en el distrito de Máncora.		Resistencia a la Elasticidad	- Porcentaje de Elasticidad	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: Experimental - Prospectivas - Longitudinal
¿De qué manera los polímeros y aditivo de Adherencia influyen en la resistencia a la fatiga de una mezcla asfáltica, en el distrito de Máncora?	Determinar que polímeros y aditivo adherente en la resistencia a la fatiga de una mezcla asfáltica, en el distrito de Máncora.	Los polímeros y aditivo de adherencia influyen en la resistencia a la fatiga de una mezcla asfáltica, en el distrito de Máncora.		Resistencia a la Fatiga	- Porcentaje de rigidez a la flexión	POBLACIÓN: Briquetas de M.A.C elaboradas en Laboratorios de BITUPER. ESTUDIO DE DISEÑO: Laboratorio; estudio de casos y control