

**UNIVERSIDAD RICARDO PALMA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE TITULACIÓN POR TESIS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**INFLUENCIA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON**  
**POLÍMEROS EN ZONAS CÁLIDAS DE PERÚ**

**TESIS**  
**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE**  
**INGENIERO CIVIL**

**PRESENTADA POR:**

**Bach. BALBIN CASTRO, MARIA LUISA**

**Bach. ENRIQUEZ LAVADO, RICHARD FABRIZIO**

**Asesor: M. Sc. Ing. HUAMÁN GUERRERO, NÉSTOR WILFREDO**

**LIMA - PERÚ**

**2020**

## **DEDICATORIA**

A mis padres, hermanos y a todos mis familiares que fueron partícipes apoyándome y confiando en mí desde un inicio.

A mi madrina Anne Marie Mambourg, a la Asociación de Alumnos de Perú y a la familia Bastin por todo el apoyo brindado durante mi etapa universitaria.

Asimismo, a mis compañeros y amigos quienes me brindaron consejos, apoyo y conocimientos a lo largo de los años de estudio, y a WJVO por ser la persona que marcó mi vida universitaria.

Maria Luisa Balbin Castro

Dedico esta tesis, especialmente, a mis padres, Tatyana y Richard, quienes me formaron para llegar a ser la persona que soy hoy en día; asimismo, a mis hermanos, abuelas, tíos, primos por estar presente, incondicionalmente, desde el primer día. Gracias a Dios por permitirme cumplir mis sueños, a mi familia por apoyarme y por alentarme a seguir adelante en cada etapa de mi vida, por enseñarme a cumplir mis objetivos y a no rendirme nunca.

Richard Fabrizio Enriquez Lavado

## **AGRADECIMIENTO**

Nuestro agradecimiento a la Universidad Ricardo Palma y a todo el plantel docente que fueron partícipes en nuestra formación como Ingenieros Civiles; a nuestro asesor Néstor Huamán G. y todas las personas que nos apoyaron en el desarrollo de la tesis.

Maria Luisa Balbin Castro y  
Richard Fabrizio Enriquez Lavado

## INDICE GENERAL

RESUMEN .....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	2
1.1.    Formulación y delimitación del problema .....	2
1.1.1. Problema general.....	3
1.1.2. Problemas Específicos .....	3
1.2.    Objetivos de la Investigación.....	3
1.2.1. Objetivo General.....	3
1.2.2. Objetivos Específicos.....	4
1.3.    Delimitación de la investigación.....	4
1.3.1. Temporal .....	4
1.3.2. Espacial .....	4
1.3.3. Temática.....	4
1.4.    Justificación e Importancia .....	4
1.4.1. Justificación .....	4
1.4.2. Importancia .....	5
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO .....	6
2.1.    Antecedentes del estudio de investigación .....	6
2.1.1. Investigaciones relacionadas con el tema .....	11
2.1.1.1. En el ámbito Nacional.....	11
2.1.1.2. En el ámbito Internacional .....	13
2.2.    Bases Teóricas vinculadas a la variable o variables de estudio .....	17
2.2.1. Asfalto.....	17
2.2.2. Refinación de Petróleo .....	18
2.2.3. Refinación de Asfalto.....	19

2.2.4. Clasificación y Grados del Asfalto .....	20
2.2.4.1. Cemento asfáltico .....	20
2.2.4.2. Asfalto diluido (o cortado).....	20
2.2.4.3. Emulsión Asfáltica.....	20
2.2.5. Propiedades Químicas del Asfalto .....	21
2.2.6. Propiedades Físicas del Asfalto .....	22
2.2.6.1. Durabilidad .....	22
2.2.6.2. Adhesión y Cohesión .....	22
2.2.6.3. Susceptibilidad a la Temperatura.....	22
2.2.6.4. Endurecimiento y Envejecimiento.....	23
2.2.7. Ensayos para determinar las Propiedades del Cemento Asfáltico .....	23
2.2.7.1. Viscosidad.....	23
2.2.7.2. Penetración.....	25
2.2.7.3. Punto de Inflamación .....	25
2.2.7.4. Prueba de Película Delgada en Horno (TFO) y Prueba de Película Delgada en Horno Rotatorio (RTFO) .....	26
2.2.7.5. Ductilidad.....	28
2.2.7.6. Solubilidad.....	29
2.2.7.7. Peso Específico .....	29
2.2.8. Agregado.....	30
2.2.8.1. Graduación y Tamaño Máximo de partícula .....	30
2.2.8.2. Limpieza .....	33
2.2.8.3. Dureza .....	33
2.2.8.4. Forma de la Partícula .....	34
2.2.8.5. Textura Superficial .....	34
2.2.8.6. Capacidad de Absorción .....	35
2.2.8.7. Afinidad por el Asfalto .....	35

2.2.9. Polímeros .....	35
2.2.9.1. Plastómeros .....	36
2.2.9.2. Elastómeros.....	37
2.2.10. Mezcla Asfáltica Convencional .....	38
2.2.10.1.Pruebas de Laboratorio para Determinar Características y comportamiento de la Mezcla Asfáltica.....	38
2.2.10.2.Propiedades consideradas en el diseño de mezcla (Método Marshall).	41
2.2.11. Procedimiento de Ensayo Marshall.....	47
2.2.11.1.Determinación del Peso Específico-Total.....	47
2.2.11.2.Estabilidad y Fluencia.....	47
2.2.12. Pavimento de concreto asfáltico en caliente (norma peruana).....	50
2.2.13. Desempeño de la mezcla asfáltica.....	51
2.2.13.1.Ensayo Hamburgo Wheel Tracking.....	51
2.2.13.2.Ensayo del Módulo de Resiliencia.....	52
2.2.13.3.Ensayo de Vida Fatiga .....	53
2.2.13.4.Ensayo de Desgaste .....	54
2.2.13.5.Ensayo de Tracción Indirecta .....	54
2.2.14. Fallas en Mezclas Asfálticas .....	55
2.2.14.1.Ahuellamiento por falla de la capa de mezcla asfáltica.....	55
2.2.15. Mezcla Asfáltica Modificada con Polímeros .....	56
2.2.15.1.Objetivo de la Modificación .....	56
2.2.15.2.Beneficios que se buscan con la Modificación del Asfalto .....	57
2.2.15.3.Compatibilidad Polímero-Asfalto.....	58
2.2.15.4.Técnicas para Modificar Asfaltos .....	61
2.2.15.5.Ensayos para determinar características de los asfaltos Modificados con Polímeros .....	62
2.2.15.6.Cemento asfáltico modificado con polímeros (norma peruana).....	64
2.2.15.7.Proceso Constructivo de Mezcla Asfáltica Modificada.....	65

2.2.16.	Proveedor de Mezclas Asfálticas Modificadas con Polímeros .....	68
2.2.16.1.	TDM Asfaltos (Perú) .....	68
2.2.17.	Costos y Presupuesto.....	68
2.2.17.1.	Análisis de Precios Unitarios .....	68
2.3.	Definición de términos básicos.....	69
CAPITULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS .....		70
3.1.	Formulación de Hipótesis .....	70
3.1.1.	Hipótesis General.....	70
3.1.2.	Hipótesis Específicos .....	70
3.2.	Variables .....	70
3.2.1.	Definición Conceptual de Variables .....	70
3.2.2.	Operacionalización de Variables .....	70
CAPITULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....		72
4.1.	Tipo y Nivel .....	72
4.2.	Diseño de investigación.....	72
4.3.	Población de Estudio .....	72
4.4.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	72
4.4.1.	Procedimientos para recolección de datos .....	72
4.4.2.	Técnicas de procesamiento y análisis de datos .....	73
CAPITULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN .....		74
5.1.	Fallas en mezclas asfálticas convencionales.....	74
5.2.	Análisis Comparativo del Comportamiento Mecánico y Desempeño de la Mezcla Asfáltica Convencional (MAC) y Mezcla Asfáltica Modificada con Polímeros (MAMP).....	76
5.2.1.	Análisis Comparativo del Comportamiento Mecánico de la Mezcla Asfáltica (Ensayo Marshall).....	76
5.2.2.	Análisis Comparativo de Desempeño de la Mezcla Asfáltica .....	80

5.3.	Análisis Comparativo Costo-Beneficio de las mezclas asfálticas .....	85
5.4.	Contrastación de Hipótesis .....	89
5.4.1.	Hipótesis específica 1.....	89
5.4.2.	Hipótesis específica 2.....	89
5.4.3.	Hipótesis específica 3.....	91
5.4.4.	Hipótesis General.....	91
CONCLUSIONES .....		92
RECOMENDACIONES.....		95
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		96
ANEXOS .....		101
Anexo 1: Matriz de Consistencia .....		101
Anexo 2: Matriz de Operacionalización de Variables .....		102
Anexo 3: Glosario .....		103
Anexo 4: Tipo de Cambio Contable.....		107
Anexo 5: Ítem 1 - Data recolectada.....		108
Anexo 6: Ítem 2 - Data recolectada.....		111
Anexo 7: Ítem 3 - Data recolectada.....		113
Anexo 8: Ítem 4 - Data recolectada.....		115
Anexo 9: Ítem 5 – Data recolectada.....		116
Anexo 10: Ítem 6 – Data recolectada.....		124

## INDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Clasificación de polímeros .....	36
Tabla N° 2: Causas y Efectos de una Poca Durabilidad .....	43
Tabla N° 3: Causas y Efectos de la Permeabilidad.....	44
Tabla N° 4: Requisitos para mezcla de concreto bituminoso .....	49
Tabla N° 5: Selección del tipo de cemento asfáltico .....	50
Tabla 6: Magnitud del Ahuellamiento (mm) .....	56
Tabla N° 7: Panorama del mejoramiento producido en las propiedades de los ligantes por diferentes clases de polímeros. ....	60
Tabla N° 8: Operacionalización de variables .....	71
Tabla N° 9: Fallas en mezclas asfálticas en zonas cálidas de Perú.....	75
Tabla N° 10: Análisis Comparativo del Comportamiento Mecánico de mezclas asfálticas (Ensayo Marshall) .....	77
Tabla N° 11: Incremento de Estabilidad de mezclas asfálticas modificadas con polímeros respecto a la mezcla asfáltica convencional.....	79
Tabla N° 12: Resultados de Ensayos de Desempeño de las Mezclas Asfálticas .....	81
Tabla N° 13: Cuadro comparativo de Análisis de Precios Unitarios.....	86
Tabla N° 14: Beneficios de la Mezcla Asfáltica Modificada con Polímero SBS .....	88
Tabla N° 15: Matriz de Consistencia.....	101
Tabla N° 16: Matriz de Operacionalización .....	102
Tabla N° 17: Tipo de Cambio Contable .....	107
Tabla N° 18: Cuadro Comparativo de Diseño de Mezcla (PEN 60/70 vs. BETUTEC IC) .....	108
Tabla 19: Resultados de los ensayos de Rueda de Hamburgo.....	110
Tabla N° 20: Resultados de Ensayo Marshall (convencional) .....	112
Tabla N° 21: Resultados de Ensayo Marshall (EVA).....	112
Tabla N° 22: Resultados de Ensayo Marshall (SBS).....	112
Tabla N° 23: Cuadro comparativo de Mezcla Asfáltica Convencional vs Mezcla Asfáltica Modificada con polímero SBS .....	113
Tabla N° 24: Análisis Comparativo Económico.....	114
Tabla N° 25: Ensayo de penetración AC - 20 con SBS.....	116
Tabla N° 26: Estabilidad y flujo Marshall mezcla convencional y modificadas.....	117

Tabla N° 27: Carpeta asfáltica con asfalto convencional de 7.5 cm de espesor.....	119
Tabla N° 28: Carpeta asfáltica con asfalto modificado con SBS de 7.5 cm de espesor	120
Tabla N° 29: Carpeta asfáltica con asfalto modificado con SBR de 7.5 cm de espesor .....	121
Tabla N° 30: Resultados del ensayo para mezcla asfáltica convencional y modificadas con polímeros SBS y SBR.....	122
Tabla N° 31: Resultados de ensayo de tracción indirecta en mezclas asfálticas .....	123
Tabla N° 32: Resultados de Estabilidad y fluencia sin envejecimiento - CAP PEN 60/70 .....	124
Tabla N° 33: Resultados de Estabilidad y fluencia con envejecimiento - CAP PEN 60/70 .....	124
Tabla N° 34: Resultados de Estabilidad y fluencia sin envejecimiento - MAMP(SBS) .....	125
Tabla N° 35: Resultados de Estabilidad y fluencia con envejecimiento - MAMP(SBS) .....	125
Tabla N° 36: Resultados de ensayo de módulo de resiliencia.....	126
Tabla N° 37: Parámetros de los modelos de vida útil de Fatiga de las mezclas asfálticas sin envejecimiento. ....	128
Tabla N° 38: Parámetros de los modelos de vida útil de Fatiga de las mezclas asfálticas con 2h de envejecimiento. ....	128
Tabla N° 39: Parámetros de los modelos de vida útil de Fatiga de las mezclas asfálticas con 4h de envejecimiento. ....	129
Tabla N° 40: Vida de fatiga de las mezclas asfálticas para una capa de 10cm en cada condición de envejecimiento. ....	129

## INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Productos y Temperaturas Típicas de Destilación.....	18
Figura N° 2: Proceso Típico de Refinación .....	19
Figura N° 3: Viscosímetro de Tubo Capilar en un Baño de Temperatura Constante.....	24
Figura N° 4: Ensayo de Penetración .....	25
Figura N° 5:(izquierda) Ensayo de Copa Abierta de Cleveland, (derecha) Ensayo de Pensky-Martens .....	26
Figura N° 6: Prueba de Película Delgada en Horno .....	28
Figura N° 7: Prueba de Película Delgada en Horno Rotatorio .....	28
Figura N° 8: Prueba de Ductilidad.....	29
Figura N° 9: Análisis de Tamices .....	32
Figura N° 10: Máquina de Desgaste de Los Ángeles .....	33
Figura N° 11: Agregados con Diferentes Formas y Texturas Superficiales.....	34
Figura N° 12: Ilustración del VMA en una Probeta de Mezcla Compactada (Nota: para simplificar, el volumen de asfalto absorbido no es mostrado).....	40
Figura N° 13: Ensayo de estabilidad y fluidez Marshall .....	49
Figura N° 14: Equipo de Wheel Tracking Teste.....	52
Figura N° 15: Ensayo de Módulo de Resiliencia.....	53
Figura N° 16: Efecto de la incorporación de un polímero sobre la susceptibilidad térmica del asfalto.....	57
Figura N° 17: Compatibilidad asfalto base-polímero SBS .....	63
Figura N° 18: Fotografía de Pavimentadora en Obra .....	66
Figura N° 19: Fotografía de Compactación de la Mezcla Asfáltica .....	67
Figura N° 20: Gráfico comparativo de Estabilidad de las investigaciones.....	79
Figura N° 21: Imágenes de probetas de ambas mezclas asfálticas (antes y después del ensayo de Rueda de Hamburgo .....	82
Figura N° 22: Gráfico Comparativo de Módulo de Resiliencia .....	84
Figura N° 23: Gráfico Comparativo de Vida de fatiga.....	85
Figura N° 24: Gráfico Comparativo de Precio Unitario por m <sup>3</sup> entre la MAC y MAMP(SBS) .....	87
Figura N° 25: Gráfico Comparativo de Precio Unitario por m <sup>2</sup> de la MAC, MAMP(SBS) y MAMP(SBR) .....	87

Figura N° 26: Valores de Estabilidad graficados de ambas mezclas.....	109
Figura N° 27: Valores de Flujo Graficados de ambas mezclas .....	109
Figura N° 28: Valores de profundidad de Ahuellamiento graficados de ambas mezclas .....	110
Figura N° 29: Deformación vs Número de Pasadas .....	111
Figura N° 30: Comparación de Estabilidad en la mezcla convencional y modificada con SBS. ....	115
Figura N° 31: Comparación de Flujo en la mezcla convencional y modificada con SBS. ....	115
Figura N° 32: Comparación estabilidad y flujo mezcla convencional AC – 20 a 6.10% y mezclas modificadas con SBS. ....	117
Figura N° 33: Comparación estabilidad y flujo mezcla convencional AC – 20 a 6.10% y mezclas modificadas con SBR.....	118
Figura N° 34: Ensayo de desgaste mezcla con asfalto AC - 20 y modificadas con SBS 2% y SBR 1% .....	122
Figura N° 35: Ensayo de tracción indirecta .....	123
Figura N° 36: Variación de MR a 25°C en función de la condición de envejecimiento. ....	127
Figura N° 37: Variación de MR a 5°C en función de la condición de envejecimiento. ....	127
Figura N° 38: Variación del MR de las mezclas en función de la temperatura y condición del envejecimiento a corto plazo.....	128
Figura N° 39: Vida de Fatiga de las mezclas asfálticas estudiadas. ....	130

## RESUMEN

La investigación fue realizada con la finalidad de dar a conocer las mejoras en el comportamiento mecánico y desempeño de la mezcla asfáltica mediante la adición de polímeros a las mezclas asfálticas, a fin de promover esta tecnología que ya tiene años de aplicación internacionalmente dando solución a la problemática que hoy en día tienen las carreteras de Perú, especialmente en lugares donde las vías están bajo altas temperaturas. Obtenidas las fuentes bibliográficas, se procedió a identificar las principales fallas que sufren hoy en día las carreteras debido a lo mencionado anteriormente, posteriormente se compararon los ensayos efectuados a mezclas asfálticas convencionales y mezclas asfálticas modificadas con los polímeros SBS, SBR y EVA donde se evaluó el comportamiento mecánico y/o el desempeño de ambas mezclas.

Los resultados obtenidos muestran mejoras significativas en el comportamiento mecánico y el desempeño de las mezclas asfálticas modificadas con los polímeros SBS (mayor incidencia) y SBR, además en el aspecto económico resultaron rentables a largo plazo debido a que no requerirán mantenimientos prematuros. Sin embargo, el uso del polímero EVA no resultó adecuado para la modificación ya que su comportamiento mecánico tiene un riesgo de fragilidad.

Palabras claves: Mezcla asfáltica modificada con polímeros, comportamiento mecánico, desempeño.

## **ABSTRACT**

The investigation was carried out in order to publicize the improvements in the mechanical behavior and performance of the asphalt mix by adding polymers to the asphalt mixes, in order to promote this technology that already has years of international application, providing a solution to the problem that Peru's roads have today, especially in places where the roads are under high temperatures. Obtaining the bibliographic sources, we proceeded to identify the main faults that roads suffer today due to the aforementioned, later the tests carried out on conventional asphalt mixtures and modified asphalt mixtures with SBS, SBR and EVA polymers were compared where it was evaluated the mechanical behavior and / or the performance of both mixtures. The results obtained show significant improvements in the mechanical behavior and performance of the asphalt mixtures modified with SBS and SBR polymers, in addition to the economic aspect, they were profitable in the long term because they will not require premature maintenance. However, the use of the EVA polymer was not suitable for the modification since its mechanical behavior has a risk of brittleness.

**Keywords:** Modified asphalt mixing with polymers, mechanical behavior, performance.

# INTRODUCCIÓN

Hoy en día, las carreteras peruanas ubicadas en zonas cálidas no cumplen con la vida útil para la cual fueron diseñadas, debido a que las mezclas asfálticas convencionales se ven afectadas por las altas temperaturas y el tránsito vehicular provocando fallas de deformación permanente y fatiga afectando la libre transitabilidad.

En los últimos 50 años aproximadamente se ha implementado la tecnología de la modificación del asfalto con polímeros que satisfacen las necesidades que requiere el asfalto convencional frente a los cambios climáticos para incrementar su vida útil. Esta tecnología ya ha sido implementada en nuestros países vecinos desde hace años, mientras que en Perú se encuentra fuera de este, ya que se continúa con el uso de la mezcla asfáltica convencional siendo un país con una gran diversidad de climas. Por ello se desarrolló la investigación, para demostrar, mediante estudios bibliográficos, la influencia del uso de polímeros en las mezclas asfálticas; su mejora en el comportamiento mecánico y desempeño de la mezcla asfáltica al emplear polímeros.

La investigación realizada se divide en 5 capítulos, en el capítulo 1 llamado, planteamiento del problema, se desarrolla la problemática, los objetivos, la justificación y las limitaciones de la investigación; en el capítulo 2, marco teórico, se habla sobre los antecedentes de la investigación y el sustento teórico del estudio, en el cual mencionamos el procedimiento Marshall, ya que hasta el momento aún es el más utilizado para el diseño de las mezclas asfálticas, además nos proporciona los valores de estabilidad y fluencia que nos indica el comportamiento mecánico; en el capítulo 3, sistema de hipótesis, se plantean las hipótesis de la investigación y el sustento de las variables; en el capítulo 4, metodología de la investigación, se define el tipo y nivel de investigación, el diseño de investigación, la población de estudio y las técnicas de recolección de datos; en el capítulo 5, presentación y análisis de resultados de la investigación, se desarrollará un análisis comparativo de los resultados de los ensayos aplicados a la mezcla asfáltica.

## CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1. Formulación y delimitación del problema

Los pavimentos flexibles del Perú no cumplen con la vida útil estimada en el diseño, debido a que las mezclas asfálticas convencionales se ven afectadas a diferentes factores externos.

Si bien es cierto, el Perú es un país que posee una gran variedad de climas debido a la existencia de la cordillera de los andes y de la corriente de Humboldt, por ende, no podemos esperar que estas mezclas asfálticas convencionales actúen de forma eficiente para los diferentes climas del país.

El comportamiento del asfalto es elástico-lineal en bajas temperaturas y frecuencias de cargas altas, sin embargo, cuando está expuesto a altas temperaturas (costa y selva) desarrolla propiedades visco-plásticas y visco-elásticas provocando una deformación permanente cuando recibe cargas repetidas de tránsito bajo ese factor externo, provocando un deterioro prematuro del pavimento.

En la actualidad, existe la tecnología de mezclas asfálticas modificadas con polímeros que satisfacen esta necesidad de mejoramiento en la calidad de vida de estos pavimentos flexibles expuestos a altas temperaturas, así como la gradiente de temperatura (cambios climáticos) que ya se usan hace unos años atrás en países vecinos de Sudamérica, evitando así el ahuellamiento o envejecimiento de la carpeta asfáltica.

“Las mezclas asfálticas modificadas con polímeros proporcionan mejoras en las propiedades del asfalto convencional, así como la reducción de la susceptibilidad térmica y el incremento de su viscosidad a temperaturas cercanas de 60°C.”  
(Huamán & Chang, 2015, p. 26)

Hoy en día, en las especificaciones técnicas generales para la construcción de carreteras se incluye los asfaltos modificados con polímeros dentro de la selección del tipo de cemento asfáltico según la temperatura media anual del lugar en donde se realice el proyecto. Sin embargo, según Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013) “la tabla 415-01 de las EG-2013, no exige el uso de asfaltos

modificados a altas temperaturas, dándonos como alternativas el CAP PEN: 40-50 o 60-70 para temperatura media anual de 24°C a más” (p. 471), debido a ello existen pocas carreteras con asfalto modificado con polímeros en zonas cálidas, las cuales no se dan a conocer su estado de arte actual para demostrar los beneficios de su aplicación.

Además, el costo de aplicación de los asfaltos modificados es mayor que los convencionales, sin embargo, es menor a largo plazo porque satisface la vida útil para lo cual ha sido diseñada, ya que no se requerirá de mantenimientos prematuros. Por ello, es necesario fomentar el uso de mezcla asfáltica modificada con polímeros en zonas con altas temperaturas debido al constante deterioro por la alta susceptibilidad térmica que tienen los asfaltos convencionales.

#### 1.1.1. Problema general

¿De qué manera influye la adición de polímeros en el comportamiento mecánico, desempeño y rentabilidad de la mezcla asfáltica en zonas cálidas para promover su uso en Perú?

#### 1.1.2. Problemas Específicos

- a) ¿Cuáles son las fallas de las mezclas asfálticas y como se relacionan con las propiedades?
- b) ¿Cuál es el tipo y porcentaje de polímero que incide en la mejora del comportamiento mecánico y desempeño para la modificación de la mezcla asfáltica?
- c) ¿Cuál es la rentabilidad de la mezcla asfáltica modificada con polímeros?

### 1.2. Objetivos de la Investigación

#### 1.2.1. Objetivo General

Determinar la influencia de la adición de polímeros en el comportamiento mecánico, desempeño y rentabilidad de la mezcla asfáltica en zonas cálidas para promover su uso en Perú.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- a) Identificar las fallas de la mezcla asfáltica y su relación con las propiedades para proponer la adición de polímeros.
- b) Determinar el tipo y porcentaje de polímero que incide en la mejora del comportamiento mecánico y desempeño para la modificación de la mezcla asfáltica.
- c) Determinar si es que es rentable la mezcla asfáltica modificada con polímero a través del Costo-Beneficio.

### 1.3. Delimitación de la investigación

#### 1.3.1. Temporal

La investigación se centrará en la recopilación bibliográfica de las investigaciones relacionadas al tema, las cuales están comprendidas entre el año 2005 al 2019.

#### 1.3.2. Espacial

La investigación se realizará en el distrito de Ate y Lurigancho, Provincia de Lima, Departamento de Lima en los meses de junio a diciembre del 2020 (26 semanas), en los que nos dedicaremos a realizar el estudio bibliográfico de las diferentes investigaciones acerca de las mezclas asfálticas modificadas con polímeros en zonas cálidas.

#### 1.3.3. Temática

La presente investigación consistirá en la recopilación bibliográfica sobre estudios comparativos (Comportamiento mecánico, Desempeño y análisis de Costo - Beneficio) de mezclas asfálticas convencionales y mezclas asfálticas modificadas con polímeros para zonas cálidas.

### 1.4. Justificación e Importancia

#### 1.4.1. Justificación

La investigación se justificará con el estudio bibliográfico de ensayos que se realizan a mezclas asfálticas modificadas con polímeros a altas temperaturas y se recaudará información acerca de la existencia de vías peruanas en zonas

cálidas donde se ha aplicado esta tecnología lo cual nos permitirá corroborar los beneficios de su aplicación.

#### 1.4.2. Importancia

La importancia de la investigación radica en fomentar la aplicación de mezclas asfálticas modificadas con polímeros en las vías ubicadas en zonas cálidas del Perú como alternativa de solución, ya que en la actualidad predomina el uso de mezclas asfálticas convencionales las cuales sufren deterioros prematuros debido a las altas temperaturas afectando la vida útil para la cual fueron diseñadas.

Lo que se busca con esta tecnología es mejorar la calidad de las vías logrando reducir costos a largo plazo evitando mantenimientos prematuros, asimismo, brindar seguridad al ciudadano para prevenir accidentes y mantener el tránsito fluido.

## CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes del estudio de investigación

En el Perú existe una problemática que, a pesar de los años, no ha sido resuelta, que es la de mejorar la tecnología de las mezclas asfálticas para lograr que alcancen su vida útil en cualquier zona del país, se sabe que por la geografía que presenta el territorio peruano, existen zonas con altas temperaturas como son en la selva alta y baja; así como en la franja costera de aproximadamente 3,000 km. a lo largo del Océano Pacífico, especialmente en la estación del verano, alcanzando temperaturas de 40°C bajo sombra. Esto genera que las carpetas asfálticas sean sometidas a temperaturas muy altas, haciéndolas propensas a fallar por deformación permanente, esto a causa de la susceptibilidad térmica que presenta el asfalto. (Huamán & Chang, 2015, pp. 29-30)

Montejo (2002) nos indica que:

El ligante asfáltico tradicional resistía bien la acción del clima y del tránsito. Pero, el constante aumento de las solicitudes debidas al mayor número de cargas por eje, a la mayor presión de inflado, a las mayores cargas por eje, a las mayores velocidades, etc. Hace que se requiera para la elaboración de las mezclas asfálticas, un ligante con mejores propiedades reológicas y mecánicas. La modificación del asfalto con la incorporación de polímeros da por resultado ligantes con extraordinarias características de elasticidad, adherencia y cohesión a un costo competitivo (p.617).

Canevarolo (2006) nos manifiesta que:

La palabra polímero se origina del griego poli (muchos) y mero (unidad de repetición). Así, un polímero es una macromolécula compuesta por muchas (decenas de miles). de unidades de repetición denominadas meros, unidas por enlace covalente. La materia prima para la producción de un polímero es el monómero, es decir, una molécula con una (mono) unidad de repetición. Dependiendo del tipo de monómero (estructura química), del número medio

de meros por cadena y del tipo de enlace covalente, podremos dividir. los polímeros en tres grandes clases: Plásticos, Cauchos y Fibras (p.21).

Figuroa, Reyes, Hernández, Jiménez, & Bohórquez (2007) nos indican que:

El uso de asfaltos modificados con polímeros permite obtener mezclas asfálticas de mayor durabilidad y comportamiento bajo las cargas de tránsito. La tecnología de asfaltos modificados se emplea desde hace varios años en diferentes países del mundo. Al utilizar cualquiera de estos modificadores, se pretende tener una resistencia al envejecimiento, a los efectos del agua y en general a las condiciones climáticas, busca una mejor adherencia con los pétreos, propiedades elásticas, de viscosidad y en general con estas condiciones se alcanzan mezclas con mayor resistencia a la deformación y a la fatiga (pp. 7-8).

Victoria, Ortiz, Ávalos, & Castañeda, (2015) en su investigación bibliográfica muestra algunos acontecimientos sobre los polímeros en el mundo, empieza en la década de los 30 cuando se empezaron a llevar a cabo proyectos de prueba en Europa, y en los 50's el látex de neopreno comenzó a utilizarse en Norte América. A finales de los 70's, Europa estaba por encima de Estados Unidos respecto al uso asfaltos modificados con polímeros, debido a que los contratistas europeos proveían garantías y se interesaban en disminuir los costos. Los altos costos para producir asfaltos modificados con polímero limitaban su uso en Estados unidos. A mediados de la década de los 80, nuevos polímeros fueron desarrollados y las tecnologías europeas comenzaron a utilizarse en Estados Unidos.

Uno de los trabajos más completos sobre asfaltos modificados fue el realizado por Collins en 1991, en el que se logró demostrar la efectividad en la mejora de las propiedades del asfalto al ser modificado, a bajas y altas temperaturas. La formación de una estructura tipo red es muy importante y se encuentra determinada por las características propias del asfalto, el tipo de polímero y la concentración del polímero. Para estudiar esta estructura utilizaron microscopía de transmisión electrónica y barrido.

En un estudio realizado para el Departamento de Transporte de Ohio en 2001, Sargand y Kim compararon la resistencia a la fatiga y la ruptura de 3 aglutinantes, uno sin modificar, uno modificado con SBS y uno modificado con SBR. Encontraron que los aglutinantes modificados eran más resistentes, tanto a la fatiga como a la ruptura, a comparación del que no fue modificado, a pesar de que los tres tuvieron el mismo grado de rendimiento.

En el año 2002, en Taiwán, los investigadores Chen, Lao y Tsai, llevaron a cabo pruebas reológicas y microscopía electrónica de barrida con la finalidad de evaluar las interacciones existentes entre el asfalto y el SBS mediante el monitoreo de cambios microestructurales de la mezcla. Encontraron que el SBS mejora las propiedades reológicas ya que forma una estructura tipo red en el aglutinante. A bajas concentraciones, el SBS actúa como un polímero disperso y no afecta significativamente las propiedades; a altas concentraciones de SBS, se empiezan a formar las estructuras tipo red, se observa un aumento en las temperaturas de punto de ablandamiento y en la dureza de la mezcla.

Tayfur y colaboradores, realizaron en 2007 un estudio para evaluar las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas controladas y modificadas. Utilizaron 5 aditivos diferentes: poliolefina amorfa, fibra de celulosa, fibra de celulosa mezclada con bitumen, poliolefina y copolímero estireno-butadieno-estireno. Determinaron mediante el estudio Marshall el contenido óptimo de asfalto para cada una de las mezclas. Llevaron pruebas de resistencia a la tracción indirecta. Ensayos estáticos a la fluencia y ensayos de fluencia repetida. Los resultados muestran que las mezclas modificadas con SBS presentan mayor resistencia a la deformación permanente, y concluyeron que el tipo de modificador afecta significativamente el comportamiento de deformación permanente.

En Venezuela, Arias y colaboradores realizaron un estudio para modificar un asfalto utilizando SBS y azufre, obteniendo un asfalto modificado homogéneo y estable, con una recuperación elástica (ASTM D6084) de 80% y una viscosidad (ASTM D4402) de 1670 cP. Esto quiere decir que el asfalto se comporta de una manera más elástica, capaz de disipar la energía generada

por altas cargas y alto tránsito, resultando en pavimentos con mayor resistencia al ahuellamiento y la fatiga.

En 2010 en la India, los investigadores Anjankumatr y Veeraragavan caracterizaron y compararon el comportamiento mecano dinámico de mezclas asfálticas modificadas con SBS y NR contra el comportamiento de mezclas realizadas con aglutinante sin modificar. De acuerdo con su investigación, la modificación de asfalto utilizando SBS y NR, reduce la susceptibilidad térmica en un 10 y 9.8%, respectivamente, aunque sólo el asfalto modificado con SBS mejoró su resistencia al agrietamiento a bajas temperaturas.

En 2013, investigadores de Turquía, examinaron las propiedades reológicas y mecánicas de ligantes bituminosos y mezclas en caliente modificados mediante la adición de diferentes polímeros. Los valores de estabilidad más altos fueron obtenidos por el asfalto modificado con SBS, mientras que los valores de fluencia más bajos fueron obtenidos por el asfalto modificado con EVA. (pp. 3-4)

Bustos, Sosa, Rodríguez, & Calderón (2018) manifiestan que:

Estireno-butadieno-estireno, conocido como SBS, es un copolímero de los más destacados y comúnmente utilizados en la modificación de asfaltos en todo el mundo. Realizando una separación de sus componentes y sus propiedades, se dice que el SBS está constituido por estireno y butadieno. El estireno de características duras y generalmente de fase dispersa le proporciona resistencia al SBS, mientras que el butadieno con características blandas contribuye con la elasticidad. Este polímero tiene una temperatura de fusión superior a 300°C, lo que implica que el polímero no se funde en ninguna de las temperaturas que se someten los ligantes asfálticos para carreteras, esto puede generar inconvenientes en la producción. Adicionalmente, estas y otras particularidades lo convierten en un polímero con propiedades elásticas, necesarias para evitar grietas a baja temperatura con total éxito. Lo anterior ha permitido que Sengoz B. y otros clasifiquen a este copolímero como el más apropiado en la modificación del asfalto debido a que mejora el rendimiento a alta y baja temperatura. A pesar de las

excelentes propiedades de este modificador, se ha reportado que no satisface totalmente las propiedades necesarias de los ligantes modificados, para emplearse en mezclas asfálticas para carreteras. Por ejemplo, Sengoz B. y otros reportaron que incorporar SBS en rangos de 3 a 5 % en masa causa un aumento considerable en el punto de ablandamiento, lo cual es favorable para disminuir la susceptibilidad a la deformación permanente a altas temperaturas, sin embargo, esta modificación a su vez disminuyó los valores de penetración, lo que induce el agrietamiento térmico a bajas temperaturas. (p. 64)

Bustos, Sosa, Rodríguez, & Calderón (2018) no indican que:

Estireno-butadieno-caucho, conocido por sus siglas en inglés como SBR, es un elastómero termoestable. Debido a sus propiedades, el SBR ha sido ampliamente utilizado en la modificación de asfaltos en diferentes porcentajes, por ejemplo, Sargand S. M. y Kim S.-S. encontraron que al incorporar SBR al asfalto mejora la capacidad resiliente a la fatiga y a la ruptura en comparación con el asfalto convencional. Khadivar y Kavussi utilizaron asfalto 60/70 modificado con porcentajes de 3, 4 y 5 % de SBR a temperaturas medias del pavimento (30 a 78°C). En este trabajo, se analizaron las propiedades reológicas, elásticas, la ductilidad y la consistencia. Como resultado se obtuvo que el asfalto aumento la ductilidad con concentraciones de 5 % en peso, traduciéndose en la mejora del agrietamiento a bajas temperaturas; asimismo, la modificación generó un aumento en la penetración, una reducción de la susceptibilidad térmica y se obtuvo un porcentaje de recuperación elástica del 54 %.

Según Yaacob y otros, al incorporar SBR en concentraciones de 1 a 5 % al asfalto, se genera una disminución en la penetración, es decir, aumenta la rigidez del asfalto causando la mejora del agrietamiento por fatiga a altas temperaturas. Por otra parte, el punto de ablandamiento se incrementa con el SBR, disminuyendo la susceptibilidad térmica. Asimismo, la modificación aumenta la viscosidad del asfalto resultante, limitando la formación de baches a altas temperaturas en las carreteras.

De acuerdo con las investigaciones consultadas, el porcentaje de modificación del SBR usualmente oscila entre 1 y 5 %. Esta concentración en el asfalto permite aumentar la viscosidad y la rigidez a altas temperaturas, además, disminuir la susceptibilidad térmica en ciertos rangos de temperatura y el agrietamiento a bajas temperaturas. Por otra parte, al incorporar SBR al asfalto, aumenta la ductilidad a baja temperatura, lo cual es importante ya que disminuye el craqueo. Otro factor importante en la incorporación de este polímero al asfalto es que genera separación de fase, y este aumento ocurre directamente con el aumento del polímero (Bustos, Sosa, Rodríguez, & Calderón, 2018, p. 65)

Borja & Cárdenas, (2019) mencionan que:

Polímero EVA pertenece a los polímeros plastómeros, al estirarlos se sobrepasa la tensión de fluencia, no volviendo a su longitud original al cesar la sollicitación, tienen deformaciones pseudoplásticas con poca elasticidad. Por ende, no son tan utilizados en la modificación del asfalto. (p. 14)

## 2.1.1. Investigaciones relacionadas con el tema

### 2.1.1.1. En el ámbito Nacional

Cahuana & Limas (2018) en su investigación indican que:

“Análisis Comparativo del Comportamiento Mecánico de una Mezcla Asfáltica Modificada con Betutec IC + Aditivo Warmix respecto a la Mezcla Asfáltica Convencional”, se realizó con la finalidad de otorgar una mejora en el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica incorporando Betutec IC – aditivo Warmix, como alternativa de solución a los problemas que afectan a la carpeta asfáltica. Se realizó ensayos Marshall para evaluar el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica convencional y modificada. Los resultados obtenidos demostraron una mejora en el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica modificada, teniendo esta mayor resistencia a la deformación, mayor cohesión y resistencia al esfuerzo cortante, también menor pérdida de resistencia por efecto del agua. Estos

resultados demuestran la durabilidad frente a los problemas externos y por lo tanto el incremento de la vida útil del pavimento. (p. xii)

Infante & Vásquez (2016) en su investigación manifiesta que:

“Estudio Comparativo del Método Convencional y uso de los Polímeros EVA y SBS en la Aplicación de Mezclas Asfálticas”, realizó un análisis comparativo del comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas convencionales y las modificadas con polímero EVA y SBS, para demostrar si los polímeros mejoran las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica convencional. Se utilizó un asfalto PEN 60/70 y agregados provenientes de la planta de asfalto “La Pluma-Lambayeque”. Se determinó el porcentaje óptimo de asfalto convencional para el diseño de mezclas, los cuales serían 5% para tránsito Liviano y 5.3% para tránsito pesado. También, se realizaron combinaciones para hallar el porcentaje óptimo de polímero SBS, obteniendo un 5% para tránsito liviano y 4 % para tránsito pesado, y con polímeros EVA, un 4% para tránsito liviano y un 3% para tránsito pesado. Finalmente, se realizó un análisis de costos unitarios durante la ejecución de un proyecto, el cual demuestra que no hay un ahorro durante el proceso, sin embargo, la vida útil del pavimento se extiende previniendo futuros gastos en la etapa de Operación y Mantenimiento. (p. 17)

Salcedo (2008) en su investigación de tesis afirma que:

“Experiencia de Modificación de Cemento Asfáltico con Polímeros SBS en Obra”, indica que la necesidad de optimizar las inversiones, las exigencias de volumen y magnitud de las cargas de tráfico que experimentan las carreteras hacen que las propiedades de los asfaltos convencionales no sean suficientes y no cumplan con el periodo de servicio deseado. Por eso, la utilización de polímeros en la modificación del asfalto es importante ya que mejora las propiedades y/o características mecánicas de resistencia a las deformaciones que se presentan por factores climatológicos y de tránsito (ahuellamiento

y fatiga respectivamente). La investigación informa la experiencia adquirida por el autor, en la modificación de cemento asfáltico con polímeros SBS in situ y su utilización en la producción y colocación de mezcla asfáltica en caliente en la ejecución del proyecto “Mantenimiento periódico de la carretera Sullana-Aguas Verdes”, en una longitud de 110 Km. (p. 3)

Villafana & Ramírez (2019) en su investigación afirma que:

“Análisis del Comportamiento de una Mezcla Asfáltica Modificada con Polímeros SBS Betutec IC y una Mezcla Asfáltica Convencional 60/70”, se realizó con el objetivo de comparar el comportamiento mecánico, desempeño de ambas mezclas y analizar como mejoran las propiedades de la mezcla asfáltica al incorporar polímeros, que por consecuente mejora la vida útil del pavimento. Se utilizó una mezcla asfáltica convencional PEN 60/70 y una mezcla asfáltica modificada con polímeros SBS, Betutec IC considerando un porcentaje de 3.5%., Se efectuó el diseño bajo las mismas condiciones, misma gradación y mismos agregados, solo modificando el líquido asfáltico hasta obtener el óptimo de cada diseño, para moldear las muestras y somterlas a ensayos de desempeño para demostrar el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas. (p. xv)

#### 2.1.1.2. En el ámbito Internacional

Avellán (2007) en su investigación de tesis nos indica que:

“Asfalto modificado con polímero”, evalúa las características de los asfaltos modificados y su uso para pavimentación de carreteras, también de los agregados utilizados para el diseño de mezcla asfáltica modificada de acuerdo a ASSHTO y ASTM. Finalmente realizó una evaluación de las ventajas, costo/beneficio que representa el uso de un asfalto modificado; también las propiedades físico-mecánicas de éste y como contribuyen a la reducción de la susceptibilidad térmica del

asfalto, haciéndolo más rígido a temperaturas elevadas y más flexible a bajas temperaturas. (p. xvii)

Acosta & Herrera (2016) en su trabajo de investigación indica que:

“Uso de polímeros tipo III para mejorar la durabilidad y el comportamiento de las mezclas asfálticas (MDC-19) empleadas en zonas cálidas”, analiza técnico-económico el uso de polímeros tipo III y su influencia en la durabilidad y el comportamiento de las mezclas asfálticas (MDC-19), con el fin de comprobar la viabilidad del uso de este tipo de mezclas en zonas cálidas.

Esta monografía nos permite percibir que la incorporación y disolución en el asfalto de un polímero mejorar las propiedades físicas y reológicas de los asfaltos convencionales y su finalidad principal es contar con ligantes más viscosos a temperaturas elevadas a fin de reducir las deformaciones permanentes de las mezclas que componen las capas o superficie de rodamiento, aumentando la rigidez. Además, que los costos de las mezclas asfálticas modificadas con polímeros resultan ser mayores en cuanto a la inversión inicial, sin embargo, si hacemos un análisis del costo a largo plazo (es decir, la vida útil de la vía); podemos concluir que el elevado costo inicial queda sobradamente compensado por la reducción del mantenimiento futuro y el alargamiento de la vida de servicio del pavimento (pp. 9-10).

Borja & Cárdenas (2019) en su trabajo de investigación indica que:

“Caracterización de mezclas asfálticas en caliente, elaboradas con el uso de cemento asfáltico modificado con polímero SBR y SBS”, analiza y compara el comportamiento de mezclas asfálticas en caliente elaboradas con cemento asfáltico modificado con diferentes porcentajes de polímero SBS (Estireno-Butadieno-Estireno) y SBR (Estireno-Butadieno) y una mezcla asfáltica convencional, mediante la evaluación del parámetro de deformación plástica, con la aplicación de ensayos normalizados, como estabilidad y flujo Marshall, pérdida

por desgaste al cántabro y tracción indirecta, con la finalidad de proporcionar información que pueda ser utilizada para la elaboración de carpetas asfálticas modificadas con la adición de polímeros. Los resultados obtenidos permiten establecer que el comportamiento de las mezclas asfálticas modificadas con polímero SBS y SBR muestran mejoras significativas respecto a las mezclas convencionales, y esto se evidencia por una disminución de la susceptibilidad térmica a bajas temperaturas, disminución del riesgo de deformación permanente mejorando su elasticidad a altas temperaturas, aumento en las capacidades de resistencia y de durabilidad en la mezcla. Se obtuvo que el porcentaje óptimo de polímero SBS es del 2 % y de SBR 1 %. El costo de producción por metro cuadrado se incrementado en un 25.36 % con SBS y un 15.84 % con SBR, con respecto a la mezcla convencional. (p. xxii).

Escalante (2007) en su trabajo de investigación manifiesta que:

“Evaluación de mezclas producidas con ligantes asfálticos peruanos convencional PEN 60/70 y modificados por polímero SBS Tipo I 60/60 y PG 76-22”, evaluó el comportamiento de los asfaltos peruanos convencional CAP PEN 60/70 y modificado por polímeros de tipo SBS Tipo I 60/60 y PG 76-22, en mezclas asfálticas, sin y con envejecimiento a corto plazo, y estableció la distribución del Grado de Desempeño (PG) de ligantes asfálticos basado en las condiciones climáticas de cada región del Perú. Para obtener la clasificación por desempeño los ligantes asfálticos procedentes de Perú, se sometieron a pruebas convencionales y de superpave. Para la evaluación de las propiedades mecánicas, sin envejecimiento y con envejecimiento a corto plazo, se moldearon un total de 196 muestras, sometidas a ensayos Marshall, Módulo de resiliencia, y vida a la fatiga. Los resultados mostraron que la adición de polímero mejora las características reológicas del ligante, mostrando mayor resistencia al envejecimiento, reduciendo la susceptibilidad térmica, presentando un mejor comportamiento de la mezcla en todos los ensayos. (p. iii)

López & Veloz (2013) en su trabajo de investigación indica que:

“Análisis Comparativo de Mezclas Asfálticas Modificadas con Polímeros SBR y SBS, con Agregados Provenientes de la Cantera de Guayllabamba”, brinda una guía básica sobre el uso de mezclas asfálticas modificadas con polímeros. Este documento deberá ser tomado de manera referencial y como ayuda para que el lector establezca sus propias especificaciones en proyectos particulares, como es de conocimiento general los resultados de diseño están en función a las características de los materiales utilizados en el proyecto. Además, este documento presenta detalladamente los procedimientos que se deben realizar para los ensayos de caracterización del agregado pétreo, asfalto y emulsión asfáltica, modificadas con diferentes porcentajes de polímero SBS y SBR, estableciendo los porcentajes óptimos de asfalto o emulsión según sea el caso y el porcentaje óptimo de polímero para la mezcla, así mismo realizar un análisis comparativo entre las mezclas asfálticas sin modificar y modificadas con polímero, teniendo en cuenta las propiedades de estabilidad y flujo de cada mezcla. Finalmente se presenta un análisis comparativo de costos entre las mezclas asfálticas modificadas y sin modificar, para que el profesional tenga en cuenta en el momento de escoger su uso en obra.  
(p. ii)

Rodríguez (2008) en su investigación de tesis nos indica que:

“Análisis de pavimento asfáltico modificado con polímero”, analiza la dosificación de concreto asfáltico convencional en caliente y un concreto asfáltico modificado con polímero en caliente, donde llega a las siguientes conclusiones, al analizar los resultados obtenidos de estabilidad y fluencia queda demostrado que las mezclas asfálticas elaboradas con asfaltos modificados poseen un mejor comportamiento que las mezclas elaboradas con asfalto convencional, tal como se esperaba, ya que la finalidad de modificar los asfaltos es mejorar sus propiedades. Los asfaltos modificados con polímeros tienden a volver a su posición original una vez que se retira el esfuerzo de tensión a

que habían sido sometidos. Por lo anterior, los objetivos que se persiguen con la modificación de los asfaltos con polímeros, es contar con ligantes más viscosos a temperaturas elevadas para reducir las deformaciones permanentes (roderas), pues los asfaltos modificados presentan una mayor recuperación de su forma, por lo tanto, menor deformación permanente de las mezclas que componen las capas de rodamiento. (p. 78)

## 2.2. Bases Teóricas vinculadas a la variable o variables de estudio

### 2.2.1. Asfalto

Asphalt Institute (1982) define el asfalto como:

Un material negro, cementante, que varía ampliamente en consistencia, entre sólido y semisólido (sólido blando), a temperaturas ambientales normales. Cuando se calienta lo suficiente, el asfalto se ablanda y se vuelve líquido, lo cual le permite cubrir las partículas de agregado durante la producción de mezcla en caliente.

Casi todo el asfalto usado en los Estados Unidos es producido por refinerías modernas de petróleo y es llamado asfalto de petróleo. El grado de control permitido por los equipos modernos de refinería permite la producción de asfaltos con características distintas, que se prestan para usos específicos. Como resultado, se producen asfaltos para pavimentación, techado y otros usos especiales.

El asfalto usado en pavimentación, generalmente llamado cemento asfáltico, es un material viscoso (espeso) y pegajoso. Se adhiere fácilmente a las partículas de agregado y, por lo tanto, es un excelente cemento para unir partículas de agregado en un pavimento de mezcla en caliente. El cemento asfáltico es un excelente material impermeabilizante y no es afectado por los ácidos, los álcalis (bases) o las sales. Esto significa que un pavimento de concreto asfáltico construido adecuadamente es impermeable y resistente a muchos tipos de daño químico. El asfalto cambia cuando es calentado y/o envejecido. Tiende a volverse duro y

frágil, y también a perder parte de su capacidad de adherirse a las partículas del agregado. Estos cambios pueden ser minimizados si se comprenden las propiedades del asfalto, y si se toman medidas, durante la construcción, para garantizar que el pavimento terminado sea construido de tal manera que pueda retardarse el proceso de envejecimiento (pp. 10-11)

## 2.2.2. Refinación de Petróleo

Asphalt Institute (1982) nos indica que:

El crudo de petróleo es refinado por destilación. Este es un proceso en el cual las diferentes fracciones (productos) son separadas fuera del crudo por medio de un aumento, en etapas, de la temperatura. Como puede verse en la Figura N° 1, las diferentes fracciones se separan a diferentes temperaturas.

Las fracciones livianas se separan por destilación simple. Los destilados más pesados, usualmente llamados gasóleos, pueden ser separados solamente mediante una combinación de calor y vacío. Como se indica en la Figura N° 1, el asfalto puede ser producido usando destilación por vacío a una temperatura aproximada de 480°C (900°F). Esta temperatura puede variar un poco, dependiendo del crudo de petróleo que se esté refinando, o del grado de asfalto que se esté produciendo.

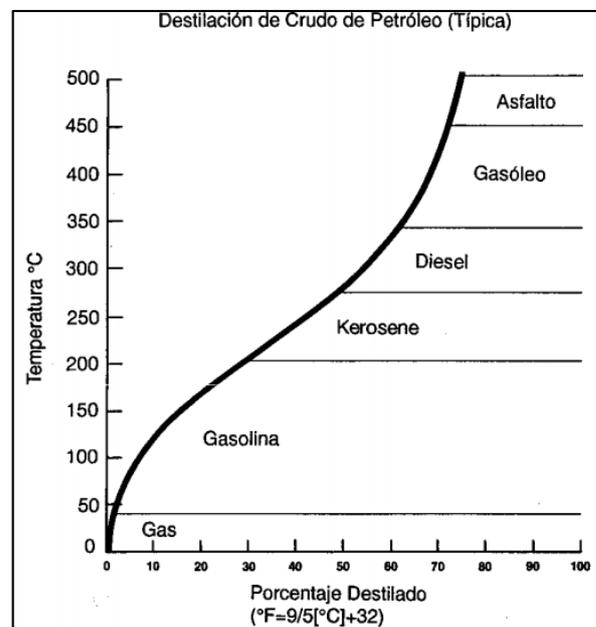


Figura N° 1: Productos y Temperaturas Típicas de Destilación  
Fuente: Asphalt Institute (1982)

La Figura N° 2 es una ilustración esquemática de una refinería típica. La figura muestra el flujo de petróleo durante el proceso de refinación (p.11).

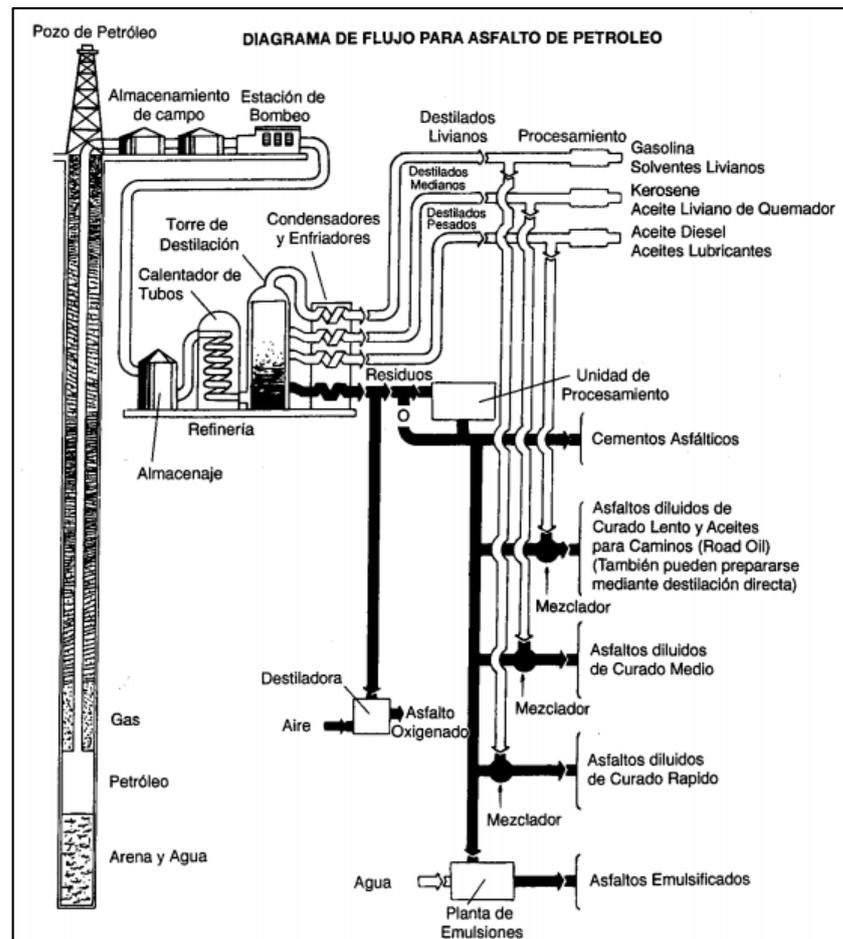


Figura N° 2: Proceso Típico de Refinación  
Fuente: Asphalt Institute (1982)

### 2.2.3. Refinación de Asfalto

Asphalt Institute (1982) indica que:

Diferentes usos requieren diferentes tipos de asfalto. Los refinadores de crudo deben tener maneras de controlar las propiedades de los asfaltos que producen, para que estos cumplan ciertos requisitos. Esto se logra, usualmente, mezclando varios tipos de crudos de petróleo antes de procesarlos. El hecho de poder mezclar permite al refinador combinar crudos que contienen asfaltos de características variables, para que el producto final posea exactamente las características solicitadas por el usuario.

Existen dos procesos por los cuales puede ser producido un asfalto, después de que se han combinado los crudos de petróleo: destilación por vacío y extracción con solventes. Como se discutió anteriormente, la destilación por vacío consiste en separar el asfalto del crudo mediante la aplicación de calor y vacío. En el proceso de extracción con solvente, se remueven más gasóleos del crudo, dejando así un asfalto residual.

Una vez que los asfaltos han sido procesados, estos pueden ser mezclados entre sí, en ciertas proporciones, para producir grados intermedios de asfalto. Es así como un asfalto muy viscoso y uno menos viscoso pueden ser combinados para producir un asfalto de viscosidad intermedia.

En resumen, para producir asfaltos con características específicas, se usa el crudo del petróleo o mezclas de crudo de petróleo. El asfalto es separado de las otras fracciones del crudo por medio de destilación por vacío o extracción con solventes. (pp.11-12)

#### 2.2.4. Clasificación y Grados del Asfalto

##### 2.2.4.1. Cemento asfáltico

Un asfalto con flujo o sin flujo, especialmente preparado en cuanto a calidad y consistencia para ser usado directamente en la producción de pavimentos asfálticos. (Asphalt Institute, 1982, p. 253)

##### 2.2.4.2. Asfalto diluido (o cortado)

Cemento asfáltico que ha sido licuado al mezclarlo con solventes de petróleo (también llamados diluyentes), en lo que se refiere a los asfaltos diluidos RC y MC. (Asphalt Institute, 1982, p. 253)

##### 2.2.4.3. Emulsión Asfáltica

Una emulsión de cemento asfáltico y agua que contiene una pequeña cantidad de un agente emulsionante. Es un sistema heterogéneo que normalmente contiene dos fases inmiscibles (asfalto y agua) en donde el agua forma la fase continua de la emulsión, y pequeños glóbulos de asfaltos

forman la fase discontinua. La emulsión del asfalto puede ser de tipo aniónico (glóbulos cargados negativamente) o catiónico (glóbulos cargados positivamente), dependiendo del agente emulsionante (Asphalt Institute, 1982, p.252)

#### 2.2.5. Propiedades Químicas del Asfalto

Asphalt Institute (1982) indica que:

Básicamente el asfalto está compuesto por varios hidrocarburos (combinaciones moleculares de hidrogeno y carbono) y algunas trazas de azufre, oxígeno, nitrógeno y otros elementos. El asfalto, cuando es disuelto en un solvente como el heptano, puede separarse en dos partes principales: asfaltenos y maltenos, mientras que los aceites actúan como un medio de transporte para los asfaltenos y las resinas:

- **Asfaltenos:** Los asfaltenos no se disuelven en el heptano. Una vez separados de los maltenos, son usualmente de color negro o pardo oscuro y se parecen al polvo grueso de grafito. Los asfaltenos le dan al asfalto su color y dureza.
- **Maltenos:** Los maltenos se disuelven en el heptano. Son líquidos viscosos compuestos de resinas y aceites. Las resinas son, por lo general, líquidos pesados de color ámbar o pardo oscuro. Proporcionan las cualidades adhesivas (pegajosidad) en el asfalto. Los aceites son de color más claro que las resinas. Actúan como un medio de transporte para los asfaltenos y las resinas.

La proporción de asfaltenos y maltenos en el asfalto puede variar debido a diversos factores, incluyendo altas temperaturas, exposición a la luz y al oxígeno, tipo de agregado usado en la mezcla del pavimento, y espesor de la película de asfalto en las partículas del agregado. Las reacciones y cambios que pueden ocurrir incluyen: evaporación de los compuestos más volátiles, oxidación (combinación de moléculas de hidrocarburo y con moléculas de oxígeno), polimerización (combinación de dos o más moléculas para formar una sola molécula más pesada), y otros cambios

químicos que pueden afectar considerablemente las propiedades del asfalto. (p. 17)

#### 2.2.6. Propiedades Físicas del Asfalto

Las propiedades físicas del asfalto de mayor importancia para el diseño, construcción, y mantenimiento de carreteras son:

##### 2.2.6.1. Durabilidad

Es la medida de qué tanto puede retener un asfalto sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento. (Asphalt Institute, 1982, p. 17)

##### 2.2.6.2. Adhesión y Cohesión

Adhesión es la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación. Cohesión es la capacidad del asfalto de mantener firmemente, en su puesto, las partículas de agregado en el pavimento terminado. (Asphalt Institute, 1982, p. 17)

##### 2.2.6.3. Susceptibilidad a la Temperatura

Todos los asfaltos son termoplásticos; esto es, se vuelven más duros (más viscosos) a medida que su temperatura disminuye, y más blandos (menos viscosos) a medida que su temperatura aumenta. Esta característica se denomina susceptibilidad a la temperatura y es una de las propiedades más valiosas en un asfalto. Es muy importante conocer la susceptibilidad a la temperatura del asfalto que va a ser utilizado, pues ella indica la temperatura adecuada a la cual se debe mezclar el asfalto con el agregado. (Asphalt Institute, 1982, p. 18)

Debe entenderse que es de vital importancia que un asfalto sea susceptible a la temperatura. Debe tener fluidez a altas temperaturas para que pueda cubrir las partículas de agregado durante el mezclado, y así permitir que estas partículas se desplacen unas respecto a otras durante la compactación. Luego deberá volverse lo suficiente viscoso, a temperaturas ambientales

normales, para mantener unidas las partículas de agregado. (Asphalt Institute, 1982, p. 20)

#### 2.2.6.4. Endurecimiento y Envejecimiento

Los asfaltos tienden a endurecerse en la mezcla asfáltica durante la construcción, y también en el pavimento terminado. Este endurecimiento es causado principalmente por el proceso de oxidación, el cual ocurre más fácilmente a altas temperaturas y en películas delgadas de asfalto. (Asphalt Institute, 1982, p. 20)

### 2.2.7. Ensayos para determinar las Propiedades del Cemento Asfáltico

#### 2.2.7.1. Viscosidad

Las especificaciones de los trabajos de pavimentación requieren, generalmente, ciertos valores de viscosidad a temperaturas de 60°C y 135°C. La viscosidad a 60°C es la viscosidad usada para clasificar el cemento asfáltico. Ella representa la viscosidad del cemento asfáltico a la temperatura más alta que el pavimento puede llegar a experimentar durante su servicio. La viscosidad a 135°C corresponde, aproximadamente, a la viscosidad del asfalto durante el mezclado y la colocación. El conocer la consistencia de un asfalto dado a estas dos temperaturas ayuda a determinar si el asfalto es apropiado o no para el pavimento que se está diseñando.

La prueba de viscosidad a 60°C utiliza un viscosímetro de tubo capilar (Figura N° 3), el cual consiste en un tubo calibrado de vidrio que mide el flujo del asfalto. El viscosímetro es colocado en un baño de agua con temperatura controlada y es precalentado a 60°C. Luego se vierte, en el extremo ancho del viscosímetro, una muestra de cemento, una muestra de cemento asfáltico calentada a la misma temperatura. (Asphalt Institute, 1982, p. 21)

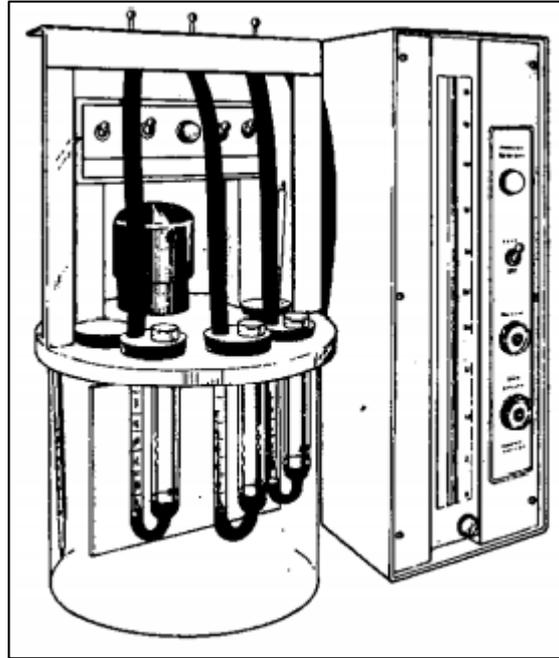


Figura N° 3: Viscosímetro de Tubo Capilar en un Baño de Temperatura Constante  
Fuente: Asphalt Institute (1982)

A una temperatura de  $60^{\circ}\text{C}$ , es necesario aplicar un vacío parcial al extremo pequeño del tubo para pasar el asfalto a través del mismo, debido a que el cemento asfáltico es muy viscoso y no puede fluir fácilmente a través de la estrecha abertura del tubo capilar. El tiempo que el asfalto toma para pasar de una marca a otra del tubo es registrado, a medida que este comienza a fluir. Este tiempo es convertido fácilmente a poises, siendo la unidad normal de medida para viscosidad de asfaltos.

El ensayo de viscosidad a  $135^{\circ}\text{C}$  es similar al ensayo descrito anteriormente; sin embargo, debe haber ciertas variaciones debido a que la temperatura es más alta. En primer lugar, es necesario usar un aceite claro en el baño con temperatura controlada debido a que el agua se evaporaría a  $135^{\circ}\text{C}$ . En segundo lugar, se utiliza un viscosímetro que no requiera de la aplicación de vacío debido a que el cemento asfáltico posee suficiente fluidez a  $135^{\circ}\text{C}$ . Por último, la medida de viscosidad utilizada es convertida a centistokes en lugar de poises, debido que el flujo a través del tubo es inducido por gravedad y no por vacío. (Asphalt Institute, 1982, p. 22)

### 2.2.7.2. Penetración

El ensayo de penetración es otra medida de consistencia. La prueba está incluida en las especificaciones basadas en viscosidad para impedir que sean usados los cementos asfálticos que tengan valores inapropiados de penetración a 25°C.

La prueba normal de penetración consiste, como primera medida, en estabilizar una muestra de cemento asfáltico a una temperatura de 25°C en un baño de agua con temperatura controlada. Seguidamente, una aguja de dimensiones prescritas se coloca sobre la superficie de la muestra bajo una carga de 100 gramos y por un tiempo exacto de 5 segundos (Figura N° 4). La distancia que la aguja penetra en el cemento asfáltico es registrada en unidades de 0.1 mm. La cantidad de estas unidades es llamada la “penetración” de la muestra. (Asphalt Institute, 1982, p. 22)

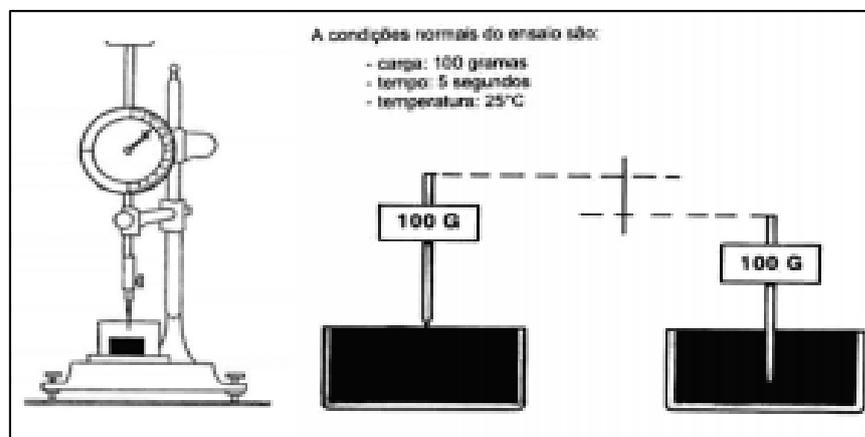


Figura N° 4: Ensayo de Penetración  
Fuente: Cavalcante (2005)

### 2.2.7.3. Punto de Inflamación

Es la temperatura más baja a la cual se separan materiales volátiles de la muestra, y crean un “destello” en presencia de una llama abierta. El punto de inflamación no debe ser confundido con el punto de combustión, el cual es la temperatura más baja a la cual el cemento asfáltico se inflama y se quema. El punto de inflamación consiste en la combustión instantánea de las fracciones volátiles que se están separando del asfalto. Se determina para identificar la temperatura máxima a la cual este puede ser manejado y almacenado sin peligro de que se inflame. Esta información es muy

importante debido a que el cemento asfáltico es generalmente calentado en su almacenaje con el fin de mantener una viscosidad lo suficiente baja para que el material pueda ser bombeado.

El procedimiento básico para determinar el punto de inflamación consiste en calentar, gradualmente, una muestra de cemento asfáltico en una copa de latón mientras se está aplicando una pequeña llama sobre la superficie de la muestra (Figura N° 5). La temperatura a la cual se presentan destellos instantáneos de vapores sobre la superficie se denomina punto de inflamación. El ensayo de Copa Abierta de Cleveland es el procedimiento comúnmente usado para determinar el punto de inflamación. Sin embargo, el Ensayo de Pensky-Martens es a veces usado. Ambos sirven el mismo propósito. (Asphalt Institute, 1982, p. 23)

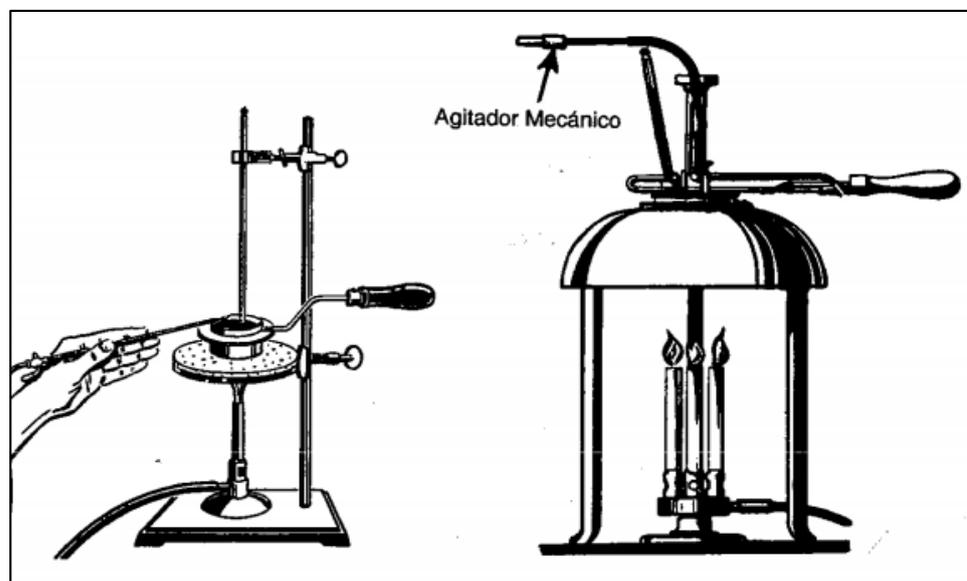


Figura N° 5:(izquierda) Ensayo de Copa Abierta de Cleveland, (derecha) Ensayo de Pensky-Martens

Fuente: Asphalt Institute (1982)

#### 2.2.7.4. Prueba de Película Delgada en Horno (TFO) y Prueba de Película Delgada en Horno Rotatorio (RTFO)

Estas pruebas son procedimientos que exponen una muestra de asfalto a unas condiciones que aproximan las ocurridas durante las operaciones de plantas de mezclado en caliente. Las pruebas de viscosidad y penetración, efectuadas sobre las muestras obtenidas después de los ensayos de TFO o

RTFO, son usadas para medir el endurecimiento anticipado del material, durante la construcción y durante el servicio del pavimento.

El procedimiento de TFO consiste en colocar una cantidad exacta de cemento asfáltico en un platillo de fondo plano tal que la muestra cubra el fondo del platillo con un espesor aproximado de 3 mm (1/8 pulgada). La muestra y el platillo se colocan, luego, en un plato rotatorio dentro de un horno (Figura N° 6), y se mantiene una temperatura de 163°C por cinco horas. En seguida se ensaya la muestra envejecida y endurecida artificialmente, para determinar su valor e viscosidad y/o penetración.

El procedimiento de RTFO tiene el mismo propósito del ensayo TFO, pero utiliza equipos y procedimientos diferentes. Como puede apreciarse en la Figura N° 7, el equipo requerido por la prueba RTFO incluye un horno especial y unas botellas especialmente diseñadas para contener la muestra del ensayo. La muestra de cemento asfáltico se coloca en la botella, y posteriormente, de costado, en un soporte rotatorio, el cual hace girar continuamente la botella dentro del horno (mantenido a 163°C). La rotación de la botella expone continuamente el cemento asfáltico en forma de películas delgadas. La abertura de la botella pasa, durante cada rotación completa, por un chorro de aire que remueve de la botella cualquier acumulación de vapores.

Las ventajas del ensayo de RTFO sobre el ensayo TFO consisten en que el horno del RTFO permite acomodar un mayor número de muestras y que el tiempo requerido para endurecer las muestras es menor. (Asphalt Institute, 1982, pp. 23-24)

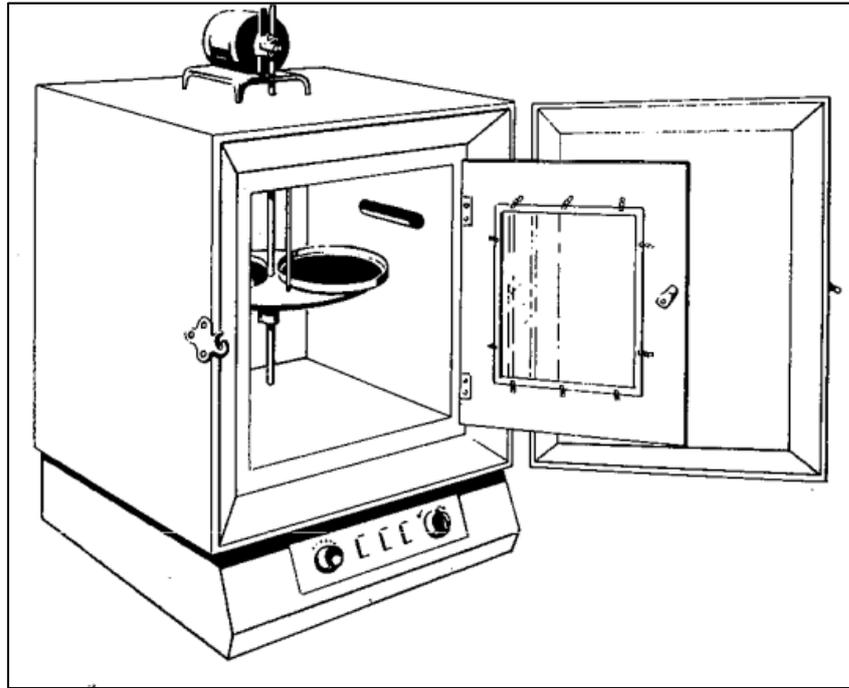


Figura N° 6: Prueba de Película Delgada en Horno  
Fuente: Asphalt Institute (1982)

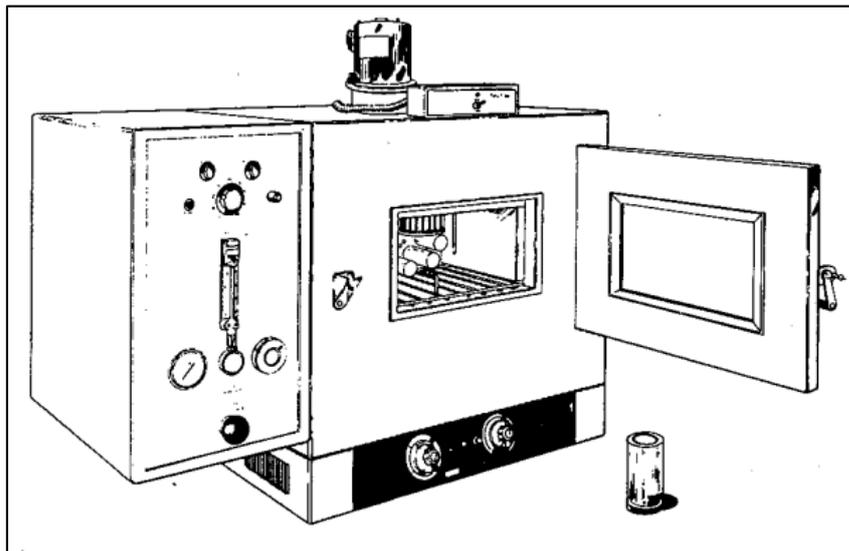


Figura N° 7: Prueba de Película Delgada en Horno Rotatorio  
Fuente: Asphalt Institute (1982)

#### 2.2.7.5. Ductilidad

La ductilidad es una medida de cuánto puede ser estirada una muestra de asfalto antes de que se rompa en dos. La ductilidad es medida mediante una prueba de “extensión”, en donde una probeta de cemento asfáltico es extendida o estirada a una velocidad y una temperatura específica (Figura

Nº 8). El estiramiento continúa hasta que el hilo de cemento asfáltico se rompa. La longitud del hilo de material en el momento del corte se mide en centímetros y se denomina ductilidad de la muestra. (Asphalt Institute, 1982, pp. 24-26)

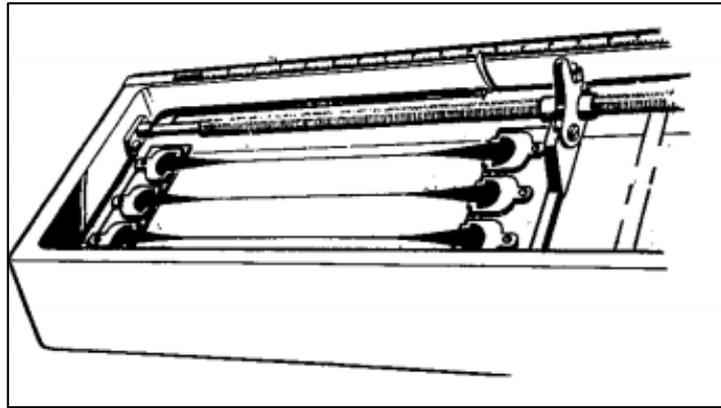


Figura Nº 8: Prueba de Ductilidad  
Fuente: Asphalt Institute (1982)

#### 2.2.7.6. Solubilidad

El ensayo de solubilidad es un procedimiento para medir la pureza de un cemento asfáltico. Una muestra es sumergida en un solvente (tricloroetileno) en donde se disuelven sus componentes cementantes activos. Las impurezas como las sales, el carbono libre, y los contaminantes inorgánicos, no se disuelven, sino que se depositan en forma de partícula. Estas impurezas insolubles son luego filtradas fuera de la solución y medidas como una proporción de la muestra original. (Asphalt Institute, 1982, p. 26)

#### 2.2.7.7. Peso Específico

El peso específico es la proporción del peso de cualquier volumen de material al peso de un volumen igual de agua, ambos a una temperatura determinada. El peso específico de un cemento asfáltico no se indica, normalmente, en las especificaciones de la obra. De todas maneras, hay dos razones importantes por las cuales se debe conocer el peso específico del cemento asfáltico usado:

- El asfalto se expande cuando es calentado y se contrae cuando es enfriado. Las medidas de peso específico proveen un patrón para efectuar correcciones de temperatura-volumen, las cuales serán discutidas más adelante.
- El peso específico de un asfalto es esencial en la determinación del porcentaje de vacíos (espacios de aire) de un pavimento compactado. El peso específico es determinado, generalmente, usando el método del picnómetro (Figura N° 9). Los resultados para el asfalto, se expresan normalmente en términos de peso específico a una temperatura dada. Esto se debe a que el peso específico varía con la expansión y la contracción del cemento asfáltico, a diferentes temperaturas. (Asphalt Institute, 1982, pp. 26-27)

#### 2.2.8. Agregado

##### Propiedades del Agregado y su Evaluación

Asphalt Institute (1982) indica que:

En un pavimento densamente graduado de mezcla asfáltica en caliente, el agregado conforma el 90 a 95 por ciento, en peso de la mezcla de pavimentación. Esto hace que la calidad del agregado usado sea un factor crítico en el comportamiento del pavimento. Sin embargo, además de la calidad, se aplican otros criterios que forman parte de la selección de un agregado en una obra de pavimentación. Estos criterios incluyen el costo y la disponibilidad del agregado. A esto se añade que los agregados deben cumplir ciertas propiedades para poder ser considerado apropiado para pavimento asfáltico de buena calidad. (p. 42)

##### 2.2.8.1. Graduación y Tamaño Máximo de partícula

Asphalt Institute (1982) indica que:

Todas las especificaciones de pavimento asfáltico de mezcla en caliente requieren que las partículas de agregado estén dentro de un cierto margen de tamaños y que la partícula de agregado esté presente en ciertas proporciones. Esta distribución de varios tamaños de partículas dentro del agregado es comúnmente llamada graduación de

la mezcla. Es necesario entender cómo se mide el tamaño de partículas y la graduación para determinar si la graduación del agregado cumple o no con las especificaciones.

- Tamaño Máximo de Partícula. - El tamaño máximo de las partículas más grandes en la muestra debe ser determinado, debido a que las especificaciones hablan de un tamaño máximo de partículas para cada agregado usado. Existen dos formas de designar tamaños máximos de partículas:
  - Tamaño máximo nominal de partículas - Designado como un tamiz más grande que el primer tamiz que retiene más del 10% de las partículas de agregado, en una serie normal de tamices.
  - Tamaño máximo de partícula - Designado como un tamiz más grande que el tamaño máximo nominal de partícula. Este es el tamiz más pequeño por el cual pasa el 100% de las partículas de agregado (p. 42).

Asphalt Institute (1982) indica que:

- Granulometría del Agregado. - La granulometría de partículas es determinada por un análisis de tamices (o granulometría) efectuado sobre las muestras de agregado. El análisis de tamices consiste en pasar la muestra por una serie de tamices, cada uno de los cuales tiene aberturas de un tamaño específico (Figura N° 9). los tamices están denominados de acuerdo con el tamaño de sus aberturas. La granulometría del agregado, o graduación de la mezcla, tiene en cuenta el porcentaje (en peso) total de muestra que pasa por cada uno de los tamices. La granulometría es determinada al calcular el peso del contenido de cada tamiz, después de haber efectuado el análisis de tamices.

Ciertos términos son usados al hacer referencia a las fracciones del agregado, con el propósito de ayudar a la descripción de estas. Siendo estas las siguientes:

- Agregado grueso, material retenido por el tamiz de 2.36 mm (No.8)
- Agregado fino, material que pasa el tamiz de 2.36 mm (No.8)
- Relleno mineral, fracciones de agregado fino que pasan el tamiz de 0.60mm (No.30)
- Polvo mineral, fracciones de agregado fino que pasa el tamiz de 0.075 mm (No.200)

El relleno y polvo minerales están presente en los agregados naturales y también son producidos, como subproducto, en la trituración de muchos tipos de roca. Ellos son esenciales para la producción de una mezcla densa, cohesiva, durable y resistente a la penetración del agua. Sin embargo, un porcentaje de más, o de menos de relleno o polvo minera, puede causar que la mezcla aparezca excesivamente seca o rica (p. 44).

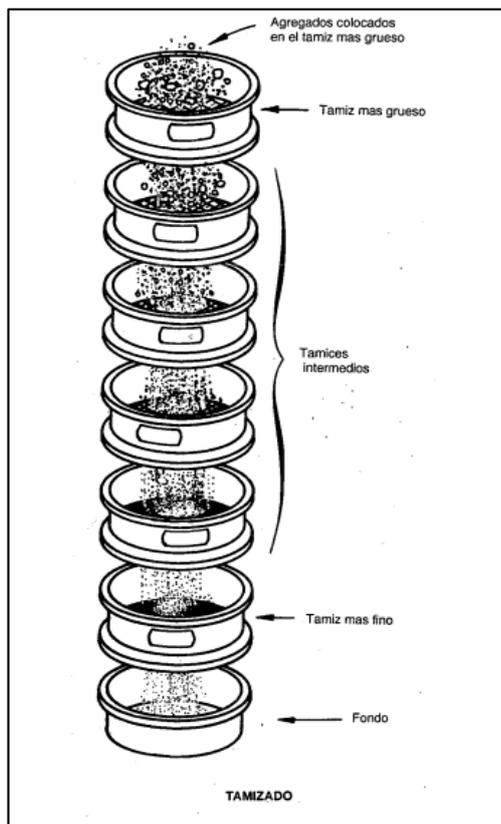


Figura N° 9: Análisis de Tamices  
Fuente: Asphalt Institute (1982)

#### 2.2.8.2. Limpieza

Las especificaciones de obra suelen colocar límite a los tipos y cantidades de materiales indeseables como son la vegetación, arcilla esquistosa, partículas blandas, terrones de arcillas, etc., en el agregado. Ya que las cantidades excesivas de estos materiales pueden afectar desfavorablemente el comportamiento del pavimento. (Asphalt Institute, 1982, p. 51).

#### 2.2.8.3. Dureza

Los agregados deben ser capaces de resistir la abrasión (desgaste irreversible) y degradación durante la producción, colocación, y compactación de la mezcla de pavimentación, y durante la vida de servicio del pavimento. Los agregados que están cerca de la superficie deben ser más duros (tener más resistencia) que los agregados usados en las capas inferiores, debido a que las capas superficiales reciben los mayores esfuerzos y el mayor desgaste por parte de las cargas de tránsito. El ensayo de desgaste de los ángeles (AASHTO T 96) mide la resistencia de un agregado al desgaste y a la abrasión. El equipo usado en el ensayo se muestra en la Figura N° 10. (Asphalt Institute, 1982, pp. 51-52).

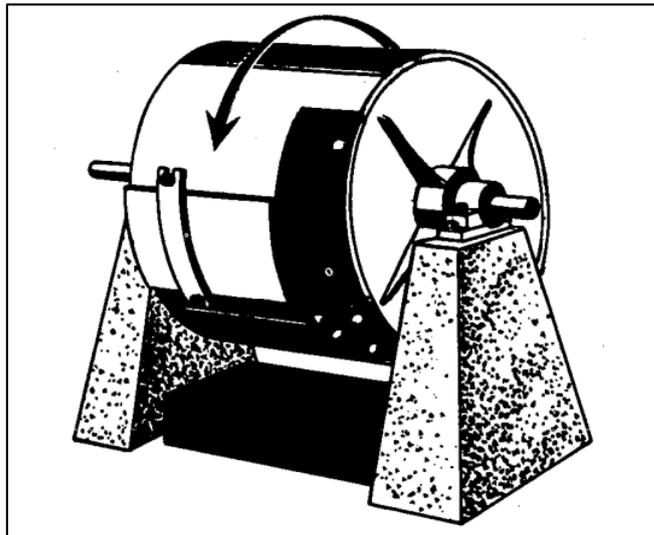


Figura N° 10: Máquina de Desgaste de Los Ángeles  
Fuente: Asphalt Institute (1982)

#### 2.2.8.4. Forma de la Partícula

La forma de la partícula (Figura N° 11) afecta la trabajabilidad de la mezcla de pavimentación durante su colocación, así como la cantidad de fuerza necesaria para compactar la mezcla a la densidad requerida. La forma de la partícula también afecta la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida. Las partículas irregulares y angulares generalmente resisten el desplazamiento en el pavimento, debido a que tienden a entrelazarse cuando son compactadas. El mejor entrelazamiento generalmente son partículas de bordes puntiagudos y de forma cúbica, producidas, casi siempre, por trituración (Asphalt Institute, 1982, p. 52).

#### 2.2.8.5. Textura Superficial

La textura superficial (Figura N° 11) de las partículas de agregado es otro factor que determina no solo la trabajabilidad y resistencia final de la mezcla de pavimentación, sino también las características de resistencia al deslizamiento en la superficie del pavimento. Las películas de asfalto se adhieren más fácilmente a las superficies rugosas que a las superficies lisas. Las gravas naturales son frecuentemente trituradas durante su procesamiento, debido a que generalmente contienen superficies lisas (Asphalt Institute, 1982, p. 53).

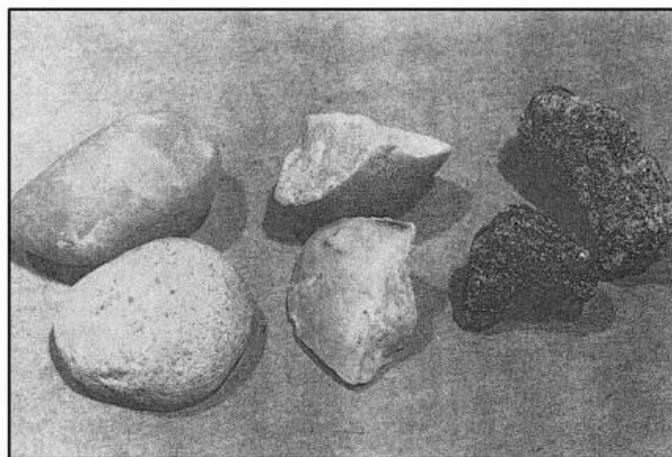


Figura N° 11: Agregados con Diferentes Formas y Texturas Superficiales.  
Fuente: Asphalt Institute (1982)

#### 2.2.8.6. Capacidad de Absorción

Todos los agregados son porosos, y algunos más que otros. La cantidad de líquido que un agregado absorbe cuando es sumergido en un baño determinan su porosidad. La capacidad de un agregado de absorber agua (o asfalto) es un elemento importante, pues si un agregado es altamente absorbente, entonces continuara absorbiendo asfalto después del mezclado inicial en la planta, dejando así menos asfalto en su superficie para ligar las demás partículas de agregado. Debido a esto, un agregado poroso requiere cantidades mucho mayores de asfalto que las que requiere un agregado menos poroso. (Asphalt Institute, 1982, p. 53)

#### 2.2.8.7. Afinidad por el Asfalto

La afinidad de un agregado con el asfalto es la tendencia del agregado a aceptar y retener una capa de asfalto. Las calizas, las dolomitas, y las rocas trapeanas tienen alta afinidad con el asfalto y son conocidas como hidrofóbicas (repelen el agua) porque resisten los esfuerzos del agua por separar el asfalto de sus superficies. Los agregados hidrofílicos (atraen el agua) tienen poca afinidad con el asfalto. Por consiguiente, tienden a separarse de las películas de asfalto cuando son expuestos al agua. En el ensayo de inmersión-compresión dos muestras de mezcla son preparadas y una es sumergida en agua. Posteriormente, ambas son ensayadas para determinar sus resistencias. La diferencia en resistencia es considerada un indicativo de la susceptibilidad del agregado al desprendimiento (Asphalt Institute, 1982, p. 44).

#### 2.2.9. Polímeros

Montejo (2002) define a los polímeros como:

Sustancias formadas por la unión, de cientos o miles de moléculas pequeñas, llamadas monómeros. La gran diversidad de materiales poliméricos hace que su clasificación y sistematización sea difícil; pero atendiendo a su estructura y propiedades, se clasifican para uso vial como se presenta en la Tabla 1. (p. 621)

Tabla N° 1: Clasificación de polímeros

Termo - Endurecibles	Termo - Plásticos	
	Plastómeros	Elastómeros
-Resinas Epoxi	-Polietileno (PE)	-S.B.R. (estireno-butadieno)
-Poliuretanos	-Polipropileno (PP)	-Cauchos Naturales: Isopreno
-Poliésteres	-E.V.A. (etileno-acetato de vinilo)	-Cauchos Artificiales: Neopreno
	-P.V.C. (policloruro de vinilo)	-S.B.S. (estireno-butadieno-estireno)

Fuente: Montejo (2002)

Montejo (2002) manifiesta que los termoplásticos:

Son polímeros solubles que se reblandecen por acción del calor y pueden llegar a fluir. Son, generalmente, polímeros lineales o ligeramente ramificados. Los termoplásticos se dividen en dos grupos:

#### 2.2.9.1. Plastómeros

Al estirarlos se sobrepasa la tensión de fluencia, no volviendo a su longitud original al cesar la sollicitación. Tienen deformaciones pseudoplásticas con poca elasticidad. Los Plastómeros más comunes son:

- Polietileno: tiene buena resistencia a la tracción y buena resistencia térmica, como también buen comportamiento a bajas temperaturas.
- Polipropileno atáctico EPDM): se lo mezcla con elastómeros para hacerlo más flexible. Muy flexible y resistente al calor y a los agentes químicos.
- E.V.A (Etileno - Acetato de Vinilo): Los copolímeros de Etileno copolimerizan al Etileno con otros monómeros (Acetato de Vinilo) para destruir su regularidad estructural y reducir su grado de cristalinidad.
- Sus propiedades dependen del peso molecular (si aumenta – menor flexibilidad y mayor dificultad para mezclarlo) y el porcentaje de Acetato de vinilo (33 al 40%: si aumenta es más flexible).
- Hay que recircularlo en almacenamiento para evitar la separación. Se lo mezcla a 160°C sin aditivos. Tiene buena compatibilidad con el asfalto.

- P.V.C (Policloruro de Vinilo): tiene muy baja actividad química, pero al mezclarlo con el asfalto a 130°C se gelifica, obteniéndose un ligante más viscoso que el original. Muy resistente a los solventes, es usado en estaciones de servicio y aeropuertos. Se usa de un 2 al 6%. Tiene bajo precio comparativamente (pp. 621-622).

#### 2.2.9.2. Elastómeros

Montejo (2002) indica que:

O cauchos son polímeros lineales amorfos, generalmente insaturados, que sometidos al proceso de vulcanización adquieren una estructura parcialmente reticulada, que le confiere sus propiedades elásticas. Los cauchos de uso más generalizado son:

- S.B.R. Cauchos sintéticos del 25% de Estireno y 75% de Butadieno. Para mejorar su adhesividad se le incorpora ácido acnlico.
- Isopreno: Caucho natural, se lo usa para hacer caucho sintético.
- Neopreno: Caucho sintético con gran resistencia a los agentes atmosféricos. Se usa en carreteras para apoyo de vigas y estructuras.
- S.B.S. (Estireno-Butadieno-Estireno) o Caucho Termoplástico: desarrollado en Estados Unidos en la década del 60 en adhesivos y suelos. Llega luego al asfalto. Los dos homopolímeros que lo forman son incompatibles entre sí. La más incompatible: el Estireno (fase dura) con temperatura de cristalización(100°C). Y el Butadieno (fase elástica) con temperatura de cristalización menor que ambiente. (pp. 622-623)

Montejo (2002) manifiesta que:

La incorporación de un polímero (sustancia macromolecular con propiedades visco-elásticas) a un asfalto dará lugar a interacciones entre las moléculas del primero y los componentes del segundo y producirá alteraciones en el sistema coloidal del asfalto, con el consiguiente cambio de propiedades. Las interacciones y cambio de propiedades producidas dependerán de los siguientes factores:

- Composición y estructura molecular del polímero incorporado (peso molecular, composición química, temperatura de transición vítrea, polaridad, etc.).
- Composición química y estructura coloidal del asfalto.
- Proporción relativa de asfalto polímero.
- Proceso de incorporación (modo de fabricación, temperatura, tiempo de mezclado, etc.). (pp. 623)

#### 2.2.10. Mezcla Asfáltica Convencional

En una mezcla en caliente de pavimentación, el asfalto y el agregado son combinaciones en proporciones exactas, estas proporciones determinan las propiedades físicas de la mezcla, así como el desempeño de esta como pavimento terminado. En este trabajo de recopilación bibliográfica se utilizó el Método Marshall para determinar estas proporciones del asfalto y agregado. (Asphalt Institute, 1982, p. 57)

##### 2.2.10.1. Pruebas de Laboratorio para Determinar Características y comportamiento de la Mezcla Asfáltica

Las pruebas de laboratorio que se realizan a las muestras de pavimento para determinar su desempeño, se orientan en las siguientes características:

- Densidad

La densidad de la mezcla compactada está definida como su peso unitario (el peso de un volumen específico de mezcla). Es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero. En las pruebas y análisis de diseño de mezclas, la densidad de la muestra compactada se expresa en kg/m<sup>3</sup> o lb/ft<sup>3</sup>. La densidad es calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua (1,000 kg/m<sup>3</sup> o 62.416 lb/ft<sup>3</sup>). (Asphalt Institute, 1982, pp. 57-58)

- Vacíos de aire

Son espacios pequeños de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios a donde pueda fluir el asfalto durante esta compactación adicional. La razón es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes, que significa lugares por las cuales pueda entrar agua y aire en la mezcla, y que como consecuencia se generen deterioros. Por otro lado, un contenido pobre en vacíos puede producir exudación de asfalto; una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie. La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más altas la densidad, menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa. (Asphalt Institute, 1982, p. 58)

- Vacíos en el agregado mineral

Son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compactada de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto. El VMA representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto y el volumen necesario en la mezcla. Cuanto mayor sea el VMA, más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para VMA los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Dichos valores se basan en el hecho de que cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durable será la mezcla. La Figura N° 12 ilustra el concepto de VMA. Para que pueda lograrse un espesor durable de película de asfalto, se deben tener valores mínimos de VMA. Un aumento en la densidad de la graduación del agregado, hasta el punto donde se obtengan valores de VMA por debajo del mínimo especificado, pueden resultar en películas delgadas de asfalto y en mezclas de baja durabilidad y

apariencia seca. Por lo tanto, es contraproducente y perjudicial, para la calidad del pavimento, disminuir el VMA para economizar en el contenido de asfalto. (Asphalt Institute, 1982, p. 58)

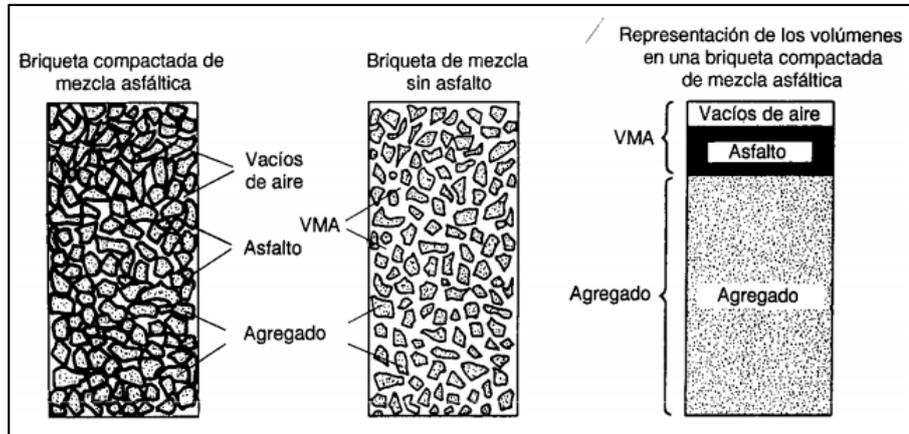


Figura N° 12: Ilustración del VMA en una Probeta de Mezcla Compactada (Nota: para simplificar, el volumen de asfalto absorbido no es mostrado).  
Fuente: Asphalt Institute (1982)

- **Contenido de Asfalto**

El contenido de asfalto de la mezcla se establece usando los criterios dictados por el diseño seleccionado. El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado, tales como la granulometría y la capacidad de absorción. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total, y mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir uniformemente todas las partículas.

Por otro lado, las mezclas más gruesas (agregados más grandes) exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficial total. La relación entre el área superficial del agregado y el contenido óptimo de asfalto es más pronunciada cuando hay relleno mineral. Los pequeños incrementos en la cantidad de relleno mineral pueden absorber gran parte del contenido del asfalto, resultando una mezcla inestable y seca. Las pequeñas disminuciones tienen el efecto contrario, por lo que con poco relleno mineral nos resulta una mezcla muy rica (húmeda). Cualquier variación en el contenido de relleno mineral causa cambio en

las propiedades de la mezcla, haciéndola varias de seca a húmeda. Si una mezcla poco, o demasiado, relleno mineral, cualquier ajuste arbitrario, para corregir la situación, probablemente la empeorara. En vez de hacer ajustes arbitrarios, se deberá efectuar un muestreo y unas pruebas apropiadas para determinar las causas de las variaciones y, si es necesario, establecer otro diseño de mezcla. La capacidad de absorción (habilidad para absorber asfalto) del agregado usado en la mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto. Esto se debe a que se tiene que agregar suficiente asfalto a la mezcla para permitir absorción, y para que además se puedan cubrir las partículas con una película adecuada de asfalto absorbido y al no-absorbido: contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto. El contenido total de asfalto es la cantidad de asfalto que debe ser adicionado a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfalto es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva no absorbido por el agregado. El contenido efectivo de asfalto se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto. (Asphalt Institute, 1982, p. 60)

#### 2.2.10.2. Propiedades consideradas en el diseño de mezcla (Método Marshall)

Las siguientes propiedades características ayudan a definir la calidad de pavimento:

- Estabilidad

La estabilidad de un asfalto es la capacidad para resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma bajo cargas repetidas; un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos (canales), ondulaciones (corrugación) y otras señas que indican en la mezcla. Los requisitos de estabilidad solo pueden establecerse después de un análisis del tránsito, debido a que las especificaciones de estabilidad para un pavimento dependen del tránsito esperado. Las especificaciones de estabilidad

deben ser lo suficiente altas para acomodar adecuadamente el tránsito esperado, pero no más altas de los que exijan las condiciones de tránsito. Valores muy altos de estabilidad producen un pavimento demasiado rígido y, por lo tanto, menos durable que lo deseado. La estabilidad de una mezcla depende de la fricción y la cohesión interna. La fricción interna en las partículas de agregado (fricción entre partículas) está relacionada con características del agregado tales como forma y textura superficial. La cohesión resulta de la capacidad ligante del asfalto. Un grado propio de fricción y cohesión interna, en la mezcla, previene que las partículas de agregado se desplacen unas respecto a otras debido a las fuerzas ejercidas por el tráfico. En términos generales, entre más angular sea la forma de las partículas de agregado y más áspera sea su textura superficial, más alta será la estabilidad de la mezcla. La fuerza ligante de la cohesión aumenta con aumentos en la frecuencia de carga (tránsito). La cohesión también aumenta a medida que la viscosidad del asfalto aumenta, o a medida que la temperatura del pavimento disminuye. Adicionalmente, y hasta cierto nivel, la cohesión aumenta con aumentos en el contenido de asfalto. Cuando se sobrepasa este nivel, los aumentos en el contenido de asfalto producen una película demasiado gruesa sobre las partículas de agregado, lo cual resulta en pérdidas de fricción entre partículas. Existen muchas causas y efectos asociados con una estabilidad insuficiente en el pavimento. (Asphalt Institute, 1982, p. 61)

- **Durabilidad**

Es la habilidad para resistir factores tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto (oxidación), y separación de las películas de asfalto. Estos factores pueden ser el resultado de la acción del clima, el tránsito, o una combinación de ambos. La durabilidad de una mezcla puede ser mejorada en tres formas. Estas son: usando la mayor cantidad posible de asfalto, usando una graduación densa de agregado resistente a la separación, y diseñando y compactando la mezcla para obtener la máxima

impermeabilidad. La durabilidad aumenta con la mayor cantidad de asfalto, porque las películas gruesas de asfalto no se envejecen o endurecen tan rápido como lo hacen las películas delgadas. En consecuencia, el asfalto retiene, por más tiempo, sus características originales. Además, el máximo contenido posible de asfalto sella eficazmente un gran porcentaje de vacíos interconectados en el pavimento, haciendo difícil la penetración del aire y del agua. Por supuesto, se debe dejar un cierto porcentaje de vacíos en el pavimento para permitir la expansión del asfalto en los tiempos cálidos. Una graduación densa de agregado firme, duro, resistente a la separación contribuye, de tres maneras, a la durabilidad del pavimento. Una graduación densa proporciona un contacto más cercano entre las partículas del agregado, lo cual mejora la impermeabilidad de la mezcla. Un agregado firme y duro resiste la desintegración bajo las cargas del tránsito. Un agregado resistente a la separación resiste la acción del agua y el tránsito, las cuales tienden a separar la película de asfalto de las partículas de agregado, conduciendo a la desintegración del pavimento. La intrusión del aire y agua en el pavimento puede minimizarse si se diseña y compacta la mezcla para darle al pavimento la máxima impermeabilidad posible. Existen muchas causas y efectos con una poca durabilidad del pavimento. La Tabla N° 2 figura una lista de algunas de estas causas y efectos. (Asphalt Institute, 1982, p. 62)

Tabla N° 2: Causas y Efectos de una Poca Durabilidad

POCA DURABILIDAD	
Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto	Endurecimiento rápido del asfalto y desintegración por pérdida de agregado
Alto contenido de vacíos debido al diseño o a la falta de compactación	Endurecimiento temprano del asfalto seguido por agrietamiento o desintegración
Agregados susceptibles al agua	Películas de asfalto se desprenden del agregado dejando un pavimento desgastado, o desintegrado

Fuente: Asphalt Institute (1982)

- Impermeabilidad

Es la resistencia al paso de aire y agua hacia su interior, o a través de él. Esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada, y es así como gran parte de las discusiones sobre vacíos en las secciones de diseño de mezcla se relaciona con impermeabilidad. Aunque el contenido de vacíos es una indicación del paso potencial de aire y agua a través de un pavimento, la naturaleza de estos vacíos es muy importante que su cantidad. El grado de impermeabilidad está determinado por el tamaño de los vacíos, sin importar si están o no conectados, y por el acceso que tienen a la superficie del pavimento.

Aunque la impermeabilidad es importante para la durabilidad de las mezclas compactadas, virtualmente todas las mezclas asfálticas usadas en la construcción de carreteras tienen cierto grado de permeabilidad. Esto es aceptable, siempre y cuando la permeabilidad esté dentro de los límites especificados. La Tabla N° 3 describe ciertas causas y efectos relacionados con valores bajos de impermeabilidad para pavimentos asfálticos de graduación densa. (Asphalt Institute, 1982, pp. 62-63)

Tabla N° 3: Causas y Efectos de la Permeabilidad

MEZCLA DEMASIADO PERMEABLE	
Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto	Las películas delgadas de asfalto causaran tempranamente un envejecimiento y una desintegración de la mezcla
Alto contenido de vacíos en la mezcla de diseño	El agua y el aire pueden entrar fácilmente en el pavimento, lo cual conducirá a infiltración de agua y baja estabilidad
Compactación inadecuada	Películas de asfalto se desprenden del agregado dejando un pavimento desgastado, o desintegrado

Fuente: Asphalt Institute (1982)

- **Trabajabilidad**

Está descrita por la facilidad con que una mezcla de pavimentación puede ser colocada y compactada. Las mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar; aquellas con mala trabajabilidad son difíciles de colocar y compactar. La trabajabilidad puede ser mejorada modificando los parámetros de la mezcla, el tipo de agregado, y/o la granulometría. Las mezclas gruesas (mezclas que contienen un alto porcentaje de agregado grueso) tienen una tendencia a segregarse durante su manejo, y también pueden ser difíciles de compactar. Un contenido demasiado alto de relleno mineral también puede afectar la trabajabilidad. Puede ocasionar que la mezcla se vuelva muy viscosa, haciendo difícil su compactación. Es importante usar mezclas trabajables en sitios donde se requiere colocar y rastrillar a mano cantidades considerables de mezcla, como por ejemplo alrededor de tapas de alcantarillados, curvas pronunciadas y otros obstáculos similares. Las mezclas que son fácilmente trabajables o deformables se conocen como mezclas tiernas. Las mezclas tiernas son demasiado inestables para ser colocadas y compactadas apropiadamente. Usualmente son el producto de una falta de relleno mineral, demasiada arena de tamaño mediano, partículas lisas y redondeadas de agregado, y/o demasiada humedad en la mezcla. Aunque el asfalto no es la principal causa de los problemas de trabajabilidad, si tienen algún efecto sobre esta propiedad. Debido a que la temperatura de la mezcla afecta la viscosidad el asfalto, una temperatura demasiado baja hará que la mezcla sea poco trabajable, mientras que una temperatura demasiado alta podrá hacer que la mezcla se vuelva tierna. El grado y el porcentaje de asfalto también pueden afectar la trabajabilidad de la mezcla. (Asphalt Institute, 1982, pp. 63-64)

- **Flexibilidad**

Es la capacidad de un pavimento asfáltico para acomodarse, sin que se agriete, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante. La flexibilidad es una característica deseable en todo pavimento asfáltico

debido a que virtualmente todas las subrasantes se asientan (bajo cargas) o se expanden (por expansión del suelo). Una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto es, generalmente, más flexible que una mezcla densamente graduada de bajo contenido de asfalto. Algunas veces los requerimientos de flexibilidad entran en conflicto con los requisitos de estabilidad, de tal manera que se debe buscar el equilibrio de estos. (Asphalt Institute, 1982, p. 64)

- Resistencia a la fatiga

Es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Se ha demostrado, por medio de la investigación, que los vacíos (relacionados con el contenido de asfalto) y la viscosidad del asfalto tienen un efecto considerable sobre la resistencia a la fatiga. A medida que el porcentaje de vacíos en un pavimento aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento (el periodo de tiempo durante el cual un pavimento en servicio es adecuadamente resistente a la fatiga) disminuye. Asimismo, un pavimento que contiene asfalto que se ha envejecido y endurecido considerablemente tiene menor resistencia a la fatiga. Las características de resistencia y espesor de un pavimento, y la capacidad de soporte de la subrasante, tienen mucho que ver con la vida del pavimento y con la prevención del agrietamiento asociado con cargas de tránsito. Los pavimentos de gran espesor sobre subrasantes resistentes no se flexionan tanto, bajo las cargas, como los pavimentos delgados o aquellos que se encuentran sobre subrasantes débiles. (Asphalt Institute, 1982, pp. 64-65)

- Resistencia al deslizamiento

Es la habilidad de una superficie de pavimento de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie está mojada. Para obtener buena resistencia al deslizamiento, el neumático debe ser capaz de mantener contacto con las partículas de agregado en vez de rodar sobre una película de agua en la superficie del pavimento. Una superficie áspera

y rugosa de pavimento tendrá mayor resistencia al deslizamiento que una superficie lisa. Además de tener una superficie áspera, los agregados deben resistir el pulimiento (alisamiento) bajo el tránsito. Las mezclas inestables que tienden a deformarse o a exudar (flujo de asfalto a la superficie) presentan problemas graves de resistencia al deslizamiento. (Asphalt Institute, 1982, p. 65)

#### 2.2.11. Procedimiento de Ensayo Marshall

Existen tres procedimientos de ensayo en el método del ensayo Marshall. Estos son: determinación del peso específico total, medición de la estabilidad Marshall, y análisis de la densidad y el contenido de vacíos de las probetas.

##### 2.2.11.1. Determinación del Peso Específico-Total

El peso específico total de cada probeta se determina tan pronto como las probetas recién compactadas se hayan enfriado a la temperatura ambiente. Esta medición de peso específico es esencial para un análisis preciso de densidad-vacíos. El peso específico total se determina usando el procedimiento descrito en la norma AASHTO T 166. (Infante & Vásquez, 2016, p. 89)

##### 2.2.11.2. Estabilidad y Fluencia

El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla. La fluencia mide la deformación, bajo carga que ocurre en la mezcla. El procedimiento de los ensayos es el siguiente:

- a) Las probetas son calentadas en el baño de agua a 60° C (140° F). Esta temperatura representa, normalmente, la temperatura más caliente que un pavimento en servicio va a experimentar.
- b) La probeta es removida del baño, secada, y colocada rápidamente en el aparato Marshall. El aparato consiste de un dispositivo que aplica a una carga sobre la probeta y de unos medidores de carga y deformación (fluencia).

- c) La carga del ensayo es aplicada a la probeta a una velocidad constante de 51 mm (2 pulgadas) por minuto hasta que la muestra falle. La falla está definida como la carga máxima que la briqueta puede resistir.
  - d) La carga de falla se registra como el valor de estabilidad Marshall y la lectura del medidor de fluencia se registra como la fluencia. (p. 90)
- Valor de estabilidad Marshall:  
El valor de estabilidad Marshall es una medida de la carga bajo la cual una probeta cede o falla totalmente. Durante un ensayo, cuando la carga es aplicada lentamente, los cabezales superior e inferior del aparato se acercan, y la carga sobre la briqueta aumenta al igual que la lectura en el indicador del cuadrante. Luego se suspende la carga una vez se obtiene la carga máxima. La carga máxima indicada por el medidor es el valor de Estabilidad Marshall. Debido a que la estabilidad Marshall indica la resistencia de una mezcla a la deformación existe una tendencia a que, si un valor de estabilidad es bueno, entonces un valor más alto será mucho mejor. (Infante & Vásquez, 2016, p. 90)
  - Valor de fluencia Marshall:  
La fluencia Marshall, medida en centésimas de pulgada representa la deformación de la briqueta. La deformación está indicada por la disminución en el diámetro vertical de la briqueta. Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad Marshall son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tiene tendencia a deformarse bajo las cargas del tránsito. (Infante & Vásquez, 2016, p. 91)
  - Análisis de densidad y vacíos:  
Una vez que se completan los ensayos de estabilidad y fluencia, se procede a efectuar un análisis de densidad y vacíos para cada serie de

Probetas de prueba. El propósito del análisis es el de determinar el porcentaje de vacíos en la mezcla compactada.



Figura N° 13: Ensayo de estabilidad y fluidez Marshall  
Fuente: Escalante (2007)

A continuación se muestran los valores mínimos de estabilidad y fluencia de la mezcla asfáltica según el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013):

Tabla N° 4: Requisitos para mezcla de concreto bituminoso

Parámetro de Diseño	Clase de Mezcla		
	A	B	C
<b>Marshall MTC E 504</b>			
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 (1) (MTC E 505)	3-5	3-5	3-5
5. Vacíos en el agregado mineral	Tabla 423-10		
<b>Inmersión - Compresión (MTC E 518)</b>			
1. Resistencia a la compresión Mpa mín	2,1	2,1	1,4
2. Resistencia retenida % (mín.)	75	75	75
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 mín.		

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013)

## 2.2.12. Pavimento de concreto asfáltico en caliente (norma peruana)

“Consiste en la fabricación de mezclas asfálticas en caliente y su colocación en una o más capas sobre una superficie debidamente preparada e imprimada.” (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013, p. 559)

- Agregados minerales gruesos:

“Los agregados minerales gruesos, deben cumplir con los requerimientos establecidos en la Tabla 423-01.” (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013, p. 559)

- Agregados minerales finos:

“Deberán cumplir con los requerimientos especificados en la Tabla 423-02.” (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013, p. 559)

- Gradación para mezcla asfáltica en caliente (MAC):

“La gradación de la mezcla asfáltica en caliente (MAC) deberá responder a algunos de los husos granulométricos, especificados en la Tabla 423-03 Alternativamente pueden emplearse las gradaciones especificadas en la ASTM D 3515 e Instituto del Asfalto.” (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013, p. 561)

- Cemento asfáltico:

Según Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013), el cemento asfáltico debe de cumplir con lo especificado en la Tabla N° 5, en donde está basado por la temperatura de la zona y clima. (p. 563)

Tabla N° 5: Selección del tipo de cemento asfáltico

Temperatura Media Anual			
24°C o más	24°C - 15°C	15°C - 5°C	Menos de 5°C
40-50 ó 60-70 ó modificado	60-70	85-100 120-150	Asfalto Modificado

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013, p.471)

Además, según Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013), debe cumplir con los requisitos de calidad del cemento asfáltico, los cuales se establecen en la Tabla 415-02 y 415-03. (p. 470)

### 2.2.13. Desempeño de la mezcla asfáltica

El desempeño de una mezcla asfáltica se analiza a través de ensayos que simulan las condiciones en campo, esto nos permite acercarnos más a la realidad. En esta investigación se identificaron los siguientes ensayos de desempeño:

#### 2.2.13.1. Ensayo Hamburgo Wheel Tracking

La Resistencia a la Deformación Permanente, es la característica que presenta la mezcla asfáltica a la falla que causa la formación de ahuellamientos que compromete la transitabilidad de los usuarios. Las peores condiciones para la deformación permanente son las altas temperaturas, tránsito lento de vehículos muy pesados. La resistencia a la deformación depende de la granulometría y forma de los agregados, contenido de ligante asfáltico, el diseño de mezcla y una apropiada compactación en obra. Para medir la resistencia a la deformación se utiliza el Ensayo de Creep Dinámico y Ensayo Wheel Tracking. (Estrada, 2017, pp. 41-42)

El WTT se utiliza para caracterizar el desempeño frente a las deformaciones permanentes de las mezclas asfálticas en condiciones controladas de laboratorio. Este cuenta con una cámara termostatazada que permite variar la temperatura y mantenerla estable durante la realización del ensayo. También permite ser configurado de manera de realizar los ensayos de acuerdo con las normativas BS 598-110 y CEN 12697-22 Ambas configuraciones de ensayo presentan características en común. La rueda de ensayo, de goma maciza de 207 mm de diámetro y 47 mm de ancho, se desplaza sobre una muestra de concreto asfáltica con movimiento alternativo dentro de un recorrido de 230 mm. La temperatura del ensayo responde las temperaturas altas del pavimento. Actualmente en Europa la EN13108-20 contempla que cada país puede elegir entre diferentes

temperaturas de ensayo dependiendo de las condiciones climáticas (de altas temperaturas) de la zona de ubicación del pavimento. Durante el ensayo se miden las deformaciones permanentes producidas en la mezcla asfáltica en intervalos de 1 min por medio de adquisición electrónica a través de un LVDT, transformador eléctrico utilizado para medir desplazamientos lineales. Cada dato de deformación permanente es resultado de un promedio de 25 mediciones realizadas en la huella de circulación en los 100 mm centrales de la probeta. La norma BS 598 especifica la toma de un único valor central, sin embargo, a fines de obtener una medida más confiable de la deformación se opta por el promedio de 25 mediciones de la norma CEN 12697-22. (Morea, 2013, p. 12)



Figura N° 14: Equipo de Wheel Tracking Teste  
Fuente: Morea (2013)

#### 2.2.13.2. Ensayo del Módulo de Resiliencia

El ensayo del módulo de resiliencia tiene como objetivo simular las condiciones en el campo, donde los materiales que constituyen el recubrimiento asfáltico están sometidos a cargas de corta duración originadas por el tráfico. Según el DNER, el módulo de resiliencia (MR) de las mezclas asfálticas es la relación entre la tensión de tracción, aplicada repetidamente en el plano vertical de una muestra cilíndrica de mezcla asfáltica, y la deformación recuperable específica, correspondiente a la tensión aplicada, a una temperatura determinada. La ASTM D 4123-82, de prueba de módulo de resiliencia por tracción indirecta, introduce el concepto de determinar esta propiedad a más de una temperatura de referencia. La ventaja de este procedimiento es la comparación entre diferentes tipos de

aglutinantes, ya que verifica la variación del comportamiento elástico con la variación de la temperatura, los valores recomendados en el estándar ASTM para la temperatura del ensayo son: 5°C, 25°C y 40°C, con una recomposición de más de una frecuencia de aplicación de carga. (Escalante, 2007, p. 124)

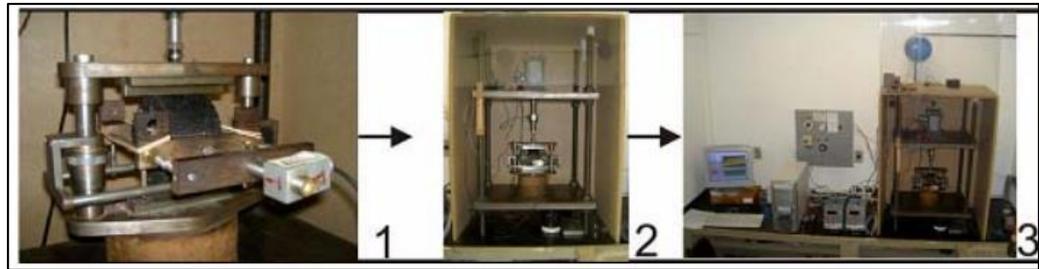


Figura N° 15: Ensayo de Módulo de Resiliencia  
Fuente: Escalante (2007)

### 2.2.13.3. Ensayo de Vida Fatiga

La resistencia a la fatiga se presenta como el número de aplicaciones de carga necesaria para que la mezcla asfáltica comience a fallar, debido a las tensiones que se producen. El fenómeno de fatiga puede ser descrito, técnicamente, como la disminución gradual de la resistencia de un material por efecto de las cargas repetitivas, o la carga y descarga constante del pavimento, debido a la acción del tráfico, que genera deformaciones elásticas. Con los fenómenos de deformación y recuperación contantes, surgen tensiones de tracción en las fibras interiores de la capa asfáltica del pavimento, que dañan el material por cada ciclo, todos estos se acumulan hasta producir la ruptura de la capa asfáltica. (Escalante, 2007)

Las mezclas óptimas diseñadas con el método Marshall, deberán ser verificadas con la medida de sus leyes de fatiga, tensión y deformación, aplicado al procedimiento de ensayo definido en las normas AASHTO T 321, NLT 350 u otros de reconocida aceptación, como los descritos en la norma europea EN-12697-24. Los ensayos se realizarán bajo condiciones de densidad, temperatura y frecuencia, representativas de las condiciones reales de operación del pavimento. Las probetas que se sometán a este

ensayo deberán ser elaboradas con una mezcla sometida a envejecimiento previo según la norma de ensayo AASHTO R-30. Aunque los resultados de los ensayos de fatiga no tengan por finalidad la aceptación o el rechazo de la mezcla por parte del Supervisor, el Contratista deberá asegurarse de que las leyes de fatiga de las mezclas que elabore sean adecuadas para las necesidades de tránsito del proyecto donde se utilizará, por cuanto será de su entera y única responsabilidad cualquier deterioro prematuro atribuible exclusivamente a la fatiga de las capas asfálticas, durante el período de garantía de estabilidad de la obra. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013, pp. 574-575)

#### 2.2.13.4. Ensayo de Desgaste

Este ensayo permite definir el porcentaje de desgaste de una mezcla compactada, refleja las condiciones de servicio de la mezcla, así como su proceso de deterioro a través del tiempo, el proceso de ensayo se realiza a una temperatura que oscila desde 15 °C a 30 °C. El ensayo se realiza en el equipo Máquina de los Ángeles, sin la utilización de las esferas de carga, únicamente se utiliza el tambor circulante programado para dar 300 revoluciones especificadas en la normativa española NLT-352, una vez terminados las 300 revoluciones, mediante determinación de pesos (antes y después del ensayo) se determina el porcentaje total de desgaste de las mezclas. (Borja & Cárdenas, 2019, pp. 168-169)

#### 2.2.13.5. Ensayo de Tracción Indirecta

La realización de este ensayo tiene como finalidad determinar la resistencia a la compresión diametral, tracción indirecta de las probetas de mezclas asfálticas.

En síntesis, este ensayo consiste en ensayar probetas previamente colocadas en un baño de agua maría a una temperatura de 25 °C, en el equipo Marshall o en su defecto en una maquina universal, la cual proporcionara una carga a la muestra. Posteriormente a esto con los datos de dimensiones de las

briquetas se procederá al cálculo de la Tracción Indirecta con la siguiente ecuación.

$$R_t = \frac{2P}{\pi HD}$$

Donde:

R<sub>t</sub>: Tracción Indirecta

P: Carga aplicada para compresión (Kg)

H: Espesor de briqueta (cm)

D: Diámetro de briqueta (cm)

#### 2.2.14. Fallas en Mezclas Asfálticas

Huamán & Chang (2015) nos dice que:

Existen dos tipos de fallas principales en las mezclas asfálticas, que son la deformación permanente y el fisuramiento por fatiga. La deformación permanente es generada por deformación plástica del concreto asfáltico y/o deformación de la subrasante. Cuando a un material granular se le inducen ciclos de carga y descarga, parte de la deformación total que se genera es recuperada y se le conoce como la deformación resiliente. Aquella deformación que no se recupera se acumula con cada repetición del ciclo y se le denomina deformación permanente. En un pavimento estas deformaciones generan hundimientos o desplazamientos que se manifiestan en la superficie como ahuellamiento e inclusive asentamientos de ser gran magnitud. La deformación permanente es también generada por la acumulación de pequeñas deformaciones que ocurren en cada capa debido a la aplicación de carga. (p. 25-26)

##### 2.2.14.1. Ahuellamiento por falla de la capa de mezcla asfáltica

Huamán & Chang (2015) nos dice que:

Este tipo de ahuellamiento se produce por la incapacidad de una mezcla asfáltica de soportar cargas pesadas, ya que generan deformaciones plásticas en cada pulso de carga las cuales se acumulan generando ahuellamiento en la capa de asfalto. Este ahuellamiento

ocurre generalmente en verano, cuando la temperatura del pavimento sobrepasa los 60°C. (p. 27)

Para definir la magnitud del ahuellamiento, se recomienda los siguientes valores:

Tabla 6: Magnitud del Ahuellamiento (mm)

Descripción	Escasa	Moderada	Severa
Ahuellamiento (mm)	< 6 mm	6 a 12 mm	> 12 mm

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2014)

## 2.2.15. Mezcla Asfáltica Modificada con Polímeros

### 2.2.15.1. Objetivo de la Modificación

Montejo (2002) indica que:

Los modificadores le permiten al diseñador intervenir sobre las características mecánicas del asfalto. Entre otras se puede mencionar la reducción de la susceptibilidad térmica, en la búsqueda de unas características reológicas constantes, especialmente a elevadas temperaturas de servicio. En consecuencia, ello implica modificar las propiedades de las mezclas, en el sentido de disminuir tanto la deformación plástica a alta temperatura, como la rigidez a baja temperatura, ofreciendo un mejor comportamiento en servicio ante la acción de cargas circulantes más pesadas del tránsito, independientemente de las condiciones climáticas imperante.

Un asfalto convencional, presenta un cambio continuo de sus características en todo el rango de temperaturas de operación. El asfalto ideal es aquel que muestra una característica más o menos constante en un amplio rango de temperaturas de servicio, convirtiéndose en un fluido viscoso a las temperaturas de la mezcla y compactación.

La adición de un polímero adecuado modifica la susceptibilidad térmica del asfalto, tal como se muestra en la Figura N° 16

obteniéndose debido a una mejora en el comportamiento viscoelástico a las temperaturas de servicio a las deseadas en un asfalto ideal. (pp. 617-618)

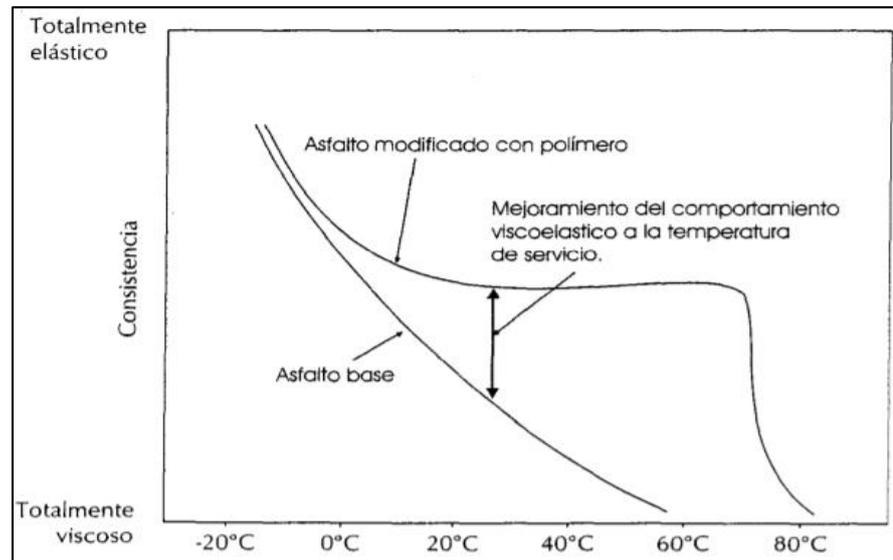


Figura N° 16: Efecto de la incorporación de un polímero sobre la susceptibilidad térmica del asfalto

Fuente: Montejo (2002, p. 618)

#### 2.2.15.2. Beneficios que se buscan con la Modificación del Asfalto

Montejo (2002) muestra que:

Los principales beneficios que se persiguen con la modificación del asfalto:

- Aumentar la rigidez a altas temperaturas de servicio mejorando la resistencia de las mezclas a la deformación permanente.
- Reducir la rigidez a bajas temperaturas, previniendo la fisuración térmica.
- Aumentar la resistencia a fatiga de las mezclas.
- Mejorar la adhesión con los agregados pétreos.
- Mejorar la cohesión, brindando mejor retención de los agregados en la vida inicial de los tratamientos superficiales.

- Reducir el endurecimiento en servicio, brindando una vida superior a la mezcla, debido a la retención de sus ventajas iniciales.
- Disminuir la susceptibilidad térmica en el rango de temperatura de servicio.
- Aumentar la viscosidad a bajas velocidades de corte, permitiendo mejores espesores de película en el agregado de las mezclas abiertas y reduciendo la exudación en tratamientos superficiales.
- Existe una variedad de aditivos que pueden ser exitosos en la mejora de cuando menos una de las propiedades del asfalto, pero, es necesario tener en cuenta que no existe un aditivo que mejore todas las propiedades antes descritas. (p. 619)

#### 2.2.15.3. Compatibilidad Polímero-Asfalto

Montejo (2002) indica que:

Si se mezclan en caliente, sin precauciones especiales, un asfalto y un polímero, se obtiene alguno de los tres resultados siguientes:

- Mezcla heterogénea: Es el caso más probable y ocurre cuando el asfalto y el polímero son incompatibles. En este caso, los componentes de la mezcla se separan y el conjunto sólo presenta las características de un ligante normal.
- Mezcla totalmente homogénea, incluso al nivel molecular: Es el caso, poco frecuente, de la compatibilidad perfecta. En este caso, el ligante es extremadamente estable, pero la modificación de sus propiedades de uso es muy débil respecto a las del asfalto original. Sólo se aumenta su viscosidad. No es, pues, el resultado deseado.
- Mezcla micro-heterogénea y constituida por dos fases imbricadas: Es el caso de la compatibilidad deseada, que permite realmente modificar el ligante. En un sistema de estas características, el polímero compatible “se hincha” absorbiendo una parte de las fracciones aceitosas ligeras del asfalto, para formar una fase polimérica diferente de la fase asfáltica residual

constituida por las fracciones pesadas del ligante – aceites restantes, resinas y asfaltenos. (pp. 623-624)

Para Montejo (2002), teniendo en cuenta que existe variedad de polímeros comerciales existentes, con composición química y propiedades diferentes, es lógico pensar que las posibilidades de modificación de los ligantes bituminosos con polímeros son compatibles con los ligantes hidrocarbonados.

Los polímeros idóneos para mejorar las propiedades de los asfaltos para uso vial son aquellos que cumplen las siguientes características:

- Cadena general suficientemente larga.
- Baja polaridad, para facilitar su compatibilidad con el asfalto.
- Peso molecular elevado, pero no excesivamente alto, para disminuir riesgos por excesiva viscosidad y problemas de dispersión.

En acuerdo a lo anterior, son dos familias de polímeros más utilizadas:

- Plastómeros, basados normalmente en copolímeros de etileno, generalmente EVA, cuyos grados difieren en función de la cuantía del acetato de vinilo y el peso molecular.
- Elastómeros, generalmente consistentes en copolímeros del tipo SBS, que se distinguen por su contenido de estireno y su configuración, lineal o radial.

En las estructuras radiales, la presencia de bloque estirénicos suplementario origina una red elástica que le confiere al ligante una baja susceptibilidad térmica y buenas características mecánicas. Por su lado, el SBS lineal proporciona las mismas propiedades y mayor flexibilidad a bajas temperaturas.

La Tabla N° 7 muestra un panorama general de las mejoras obtenidas al modificar los asfaltos con las diferentes clases de polímeros compatibles, así como con la incorporación de llantas de caucho usadas, y brinda una indicación de sus costos relativos.

Tabla N° 7: Panorama del mejoramiento producido en las propiedades de los ligantes por diferentes clases de polímeros.

Panorama del mejoramiento producido en las propiedades de los ligantes por diferentes clases de polímeros				
Polímero	Resistencia a la deformación permanente	Adhesión a los agregados	Resistencia al envejecimiento	Incremento de costo
Termoendurecibles	+++	+	+	Muy alto
Elastómeros	++	+	0+	Medio alto
Plastómeros	1	0	0	Medio medio
Caucho de llanta usada	0/1	0	0	Medio

+++ muy efectivo

++ mejora sustancial

+ mejora significativa

0 poca o ninguna mejora

Fuente: Montejo (2002)

Los polímeros termoendurecibles producen ligantes de propiedad muy superiores, pero resultan muy costosos y difíciles de elaborar y aplicar. Los ligantes con niveles significativos de elastómeros (tipo SBS mejoran sustancialmente la resistencia a la deformación y al fisuramiento térmico y por fatiga, mejoran la adhesividad con los agregados y también favorecen la resistencia al envejecimiento. Los ligantes que contienen plastómeros como el EVA, mejoran la resistencia a la deformación permanente, pero tienen menor efecto sobre las demás características, por último, el comportamiento con caucho de llantas es muy variable, dependiendo del tipo y porcentaje de caucho y de, las condiciones de procesamiento. Para generar los

beneficios indicados en la tabla se requiere incorporar entre 8% y 20% del caucho, a temperaturas muy elevadas (200 a 230°C). (pp. 624-625)

#### 2.2.15.4. Técnicas para Modificar Asfaltos

Acosta & Herrera (2016) indica que:

Cuando se añaden polímeros al asfalto, las propiedades del asfalto modificado dependen de los siguientes parámetros:

- Tipo de polímero a emplearse ya sean elastómeros o plastómeros.
- Su forma física.
- Naturaleza y grado de asfalto.
- Tipo de equipo.
- Tiempo y temperatura durante el mezclado.
- La compatibilidad Asfalto - Polímero.

El proceso apropiado de modificación es variable de acuerdo al tipo de polímero, polímeros del tipo SBS requieren etapas de molienda y otros como el tipo EVA requieren solamente proceso de agitación. (p. 34)

En la investigación de Rodriguez (2008) mencionan de manera general las etapas importantes del proceso de modificación:

- Polímero EVA  
En esta no se requiere un molino, solamente es con agitación y temperatura, en un tiempo corto el polímero se funde y se incorpora al asfalto. Por lo regular son 2 horas a 180° C, el control de calidad se observa mediante la prueba visual (microscopía óptica).
- Polímero Látex SBR  
La operación de modificación se lleva a cabo a una temperatura de 160° C a 170° C. La adición del látex se realiza mediante una

bomba de diafragma que puede ser adicionada mediante aire o motor eléctrico. El tiempo de agitación depende del equipo empleado. Los tiempos normales para todo el proceso del látex y mezclado oscilan entre 1.5 y 2 horas.

- Polímero SBS

Etapa 1. Evaluar el asfalto base.

Etapa 2. Incrementar la temperatura del asfalto.

Etapa 3. Proceso de molienda y/o homogeneización asfalto - polímero. Se requiere de un molido de alto corte.

Etapa 4. Controlar la calidad a través de microscopía óptica.

Etapa 5. Finalización de la reacción. Control de calidad realizando corrida de pruebas físicas para asfaltos modificados después de 24 horas de reacción. Las temperaturas de mezclado son de 180° C a 190° C. Y el tiempo de mezclado varía dependiendo de la dispersión del polímero. (p. 29)

#### 2.2.15.5. Ensayos para determinar características de los asfaltos Modificados con Polímeros

Montejo (2002) indica que:

En la actualidad, los asfaltos modificados se caracterizan a través de ensayos de tipo convencional, así como de otros que se han desarrollado específicamente adaptados a las particularidades de este nuevo ligante.

Algunos de ellos se describen someramente a continuación (p. 625):

- Ensayos de identificación y composición:

Estos ensayos tienen por objeto conocer el tipo y proporciones del polímero en el ligante.

En algunos polímeros de uso generalizado en la modificación de los ligantes bituminosos, como los copolímeros de estireno-butadieno-estireno (SBS), se determina su proporción mediante técnicas analíticas convencionales, como son la extracción

selectiva con disolvente o precipitación del polímero; pero generalmente es necesario el empleo de técnicas como la espectroscopia infrarroja, cromatografía sobre geles porosos, etc., para su determinación. (Montejo, 2002, p. 626)

- Ensayos de compatibilidad:

Se debe hacer una estimación a priori de la compatibilidad para el caso de polímeros termoplásticos y cauchos sin vulcanizar, comparando los parámetros de solubilidad del polímero y del ligante; o bien mediante la relación hidrofílica -lipofílica (HLB) si el polímero es un termoendurecible; pero el control de la dispersión del polímero en el ligante se realiza generalmente por microscopía óptica de fluorescencia(Figura N° 8) por reflexión técnica que permite observar la micromorfología de estos ligantes.

La micromorfología depende, además del método y condiciones de fabricación, de la compatibilidad de los dos componentes, por lo que puede ser un método rápido para evaluar esta característica. (Montejo, 2002, p. 626)

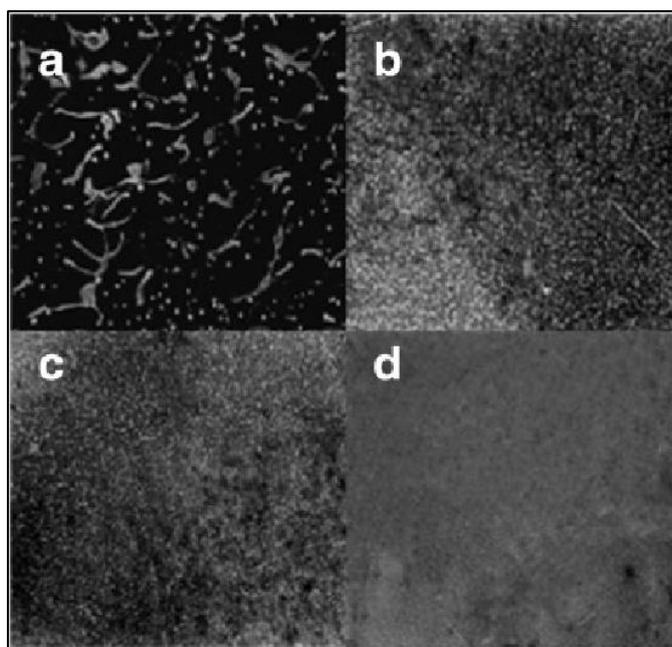


Figura N° 17: Compatibilidad asfalto base-polímero SBS  
Fuente: Bustos, Sosa, Rodríguez, & Calderón (2018)

- Ensayos para determinar la estabilidad al almacenamiento:

Durante el almacenamiento a elevadas temperaturas se pueden producir, en los ligantes modificados con polímeros, fenómenos de cremado o sedimentación, enriqueciéndose el ligante en polímero en la parte superior o inferior del tanque, dependiendo de la densidad del polímero respecto al ligante. Esta desestabilización se puede producir por falta de compactibilidad entre ambos, y/o por dispersión incorrecta del polímero, porque el sistema y condiciones de mezclado sean deficientes.

La mayoría de los procedimientos ideados para valorar este fenómeno consisten en mantener el ligante-polímero en un recipiente en posición vertical sobre una estufa a elevada temperatura durante un período de tiempo razonable y tomar muestras en la parte superior e inferior del recipiente para detectar las diferencias de concentración del polímero entre ellas, generalmente de manera indirecta a través del ensayo de punto de ablandamiento. (Montejo, 2002, p. 626)
  
- Ensayos de comportamiento reológico y susceptibilidad a la temperatura:

Las propiedades reológicas de los ligantes-polímero se evalúan generalmente mediante los ensayos convencionales utilizados en la caracterización de los ligantes bituminosos, es decir: penetración, punto de ablandamiento, índice de penetración, punto de fragilidad Fraass, ductilidad y viscosidad a varias temperaturas. (Montejo, 2002, p. 627)

#### 2.2.15.6. Cemento asfáltico modificado con polímeros (norma peruana)

Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2013) nos dice que:

El cemento asfáltico modificado con polímeros es un material bituminoso aglomerante, de consistencia sólida, al que se le agrega un polímero para mejorar sus propiedades visco-elásticas, utilizados para la fabricación de mezclas asfálticas en caliente.

“El material bituminoso será el cemento asfáltico modificado con polímero de acuerdo con las características del proyecto y que cumplen los requisitos de calidad establecidos en las Tablas 431-01,431-02 y 431-03 y 431-04”. (p. 619)

El cemento asfáltico modificado con polímero deberá homogenizarse solamente mediante agitación manual al momento de preparar las muestras para ejecutar los diferentes ensayos. El cemento asfáltico modificado no deberá calentarse a una temperatura superior a lo indicado por el proveedor, a fin de evitar posible daño al elastómero o plastómero adicionado. Todo cargamento de material bituminoso que llega a obra debe tener un certificado de control de calidad, con los resultados de ensayos especificados, además de traer la indicación clara del origen, tipo y cantidad del contenido. El muestreo deberá realizarse según lo establecido en la norma MTC E-301. Los rangos de temperatura de calentamiento del material bituminoso modificado, en obra, serán establecidos según recomendación del proveedor y especificaciones técnicas de cada proyecto. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013, p.696)

#### 2.2.15.7. Proceso Constructivo de Mezcla Asfáltica Modificada

En la investigación de Avellán (2007), se utilizó 360 toneladas de mezcla asfáltica modificada en un tramo de 813 metros de carretera, el área donde fue tendida fue un tramo plano con una sección curva.

El Equipo utilizado es similar al que se usa en una mezcla asfáltica convencional, no se utiliza la compactadora neumática, se utiliza un camión regador para aplicar el riego de liga, una máquina pavimentadora para colocar la carpeta asfáltica del espesor requerido y un rodo vibratorio de doble tambor para la compactación.

También se requieren los operadores de cada máquina, un operador del camión regador, un operador para la máquina pavimentadora, dos personas encargadas de emparejar las orillas de la pavimentadora, un

encargado de chequear el espesor de la carpeta y un operador del rodo vibratorio.

La aplicación de la mezcla con asfalto modificado fue sobre un pavimento asfáltico, el proceso que se siguió fue el siguiente:

- Se verificó que la superficie esté completamente nivelada y libre de cualquier clase de desechos antes de empezar a pavimentar.
- Se aplicó un riego de liga a razón de 0.07 a 0.18 gal/m<sup>2</sup>, con la finalidad de que exista adherencia entre la carpeta existente y la nueva.
- Se revisó la temperatura a la que se entregó la mezcla asfáltica ya que no es adecuado compactar a temperaturas muy bajas.
- La pavimentación se llevó a cabo utilizando una pavimentadora o finisher, la cual está conformada por dos unidades: la del tractor y la del enrasador. La unidad del tractor incluye una planta motriz y el enrasador es el encargado de colocar la carpeta de mezcla en caliente y controlar el espesor de esta, aunque el espesor es siempre revisado por un encargado que va midiendo con una varilla graduada. La plancha del enrasador debe ser calibrada para estar a la temperatura de la mezcla y evitar enfriamiento prematuro de la mezcla asfáltica. (Ver Figura N° 19)



Figura N° 18: Fotografía de Pavimentadora en Obra  
Fuente: Avellán (2007)

- Se procedió a compactar, esto consistió en comprimir el volumen de mezcla asfáltica para así obtener un volumen menor con el fin de aumentar la resistencia y estabilidad de la mezcla, también de cerrar los espacios por donde pueda colarse agua o aire, debido a que estos dos factores son dañinos. La carpeta fue compactada a 132 – 141°C, se deben evitar temperaturas menores debido a que el tipo de asfalto utilizado ha sido modificado con polímeros de tipo elastómeros, lo cual hace que el bitumen se vuelva más viscoso y esta propiedad aumenta conforme la temperatura disminuye. (Ver Figura N° 20)



Figura N° 19: Fotografía de Compactación de la Mezcla Asfáltica  
Fuente: Avellán (2007)

En el proceso de compactación se utilizó únicamente un rodo vibratorio doble tambor. No es necesario utilizar una compactadora neumática.

El tiempo utilizado para la aplicación de la carpeta fue de 4 horas, y las condiciones climáticas fueron favorables, con una temperatura ambiente de 27°C.

## 2.2.16. Proveedor de Mezclas Asfálticas Modificadas con Polímeros

### 2.2.16.1. TDM Asfaltos (Perú)

A finales de 2005 la empresa (TDM), en asociación con Ipiringa Asfaltos de Brasil, inició la producción de polímero de asfalto modificado (AMP), teniendo como materia prima el cemento asfáltico PEN 60/70 y el copolímero en bloque *Styrene – Butadiene – Styrene* (SBS), con el nombre comercial de asfalto modificado polímero SBS Betutec tipo I 60/60, ahora llamado Betutec IC en Perú. (Escalante, 2007, p. 2)

Actualmente, su laboratorio de Mezclas Asfálticas es el único en el país que ofrece soporte en el en el diseño de mezclas de alto desempeño. Estos ensayos mecánicos nos permiten tener una información clara del comportamiento de las mezclas asfálticas y la susceptibilidad que este pueda presentar ante los problemas de deformación permanente y fatiga, haciendo posible hacer un diseño de mezcla acorde a los requerimientos del proyecto.

## 2.2.17. Costos y Presupuesto

Sabemos que toda actividad genera una serie de costos que influyen directamente en el valor de la obra, como por ejemplo los materiales, y otras que influyen en forma indirecta como son los honorarios.

Haciendo una clasificación obtenemos:

- Costos Directos: materiales, mano de obra, equipos, campamento, herramientas.
- Costos Indirectos: supervisión, honorarios, administración, impuestos, costos financieros, ventas.

Resumiendo:

Costos directo + costo indirecto + utilidad = costo total de la obra.

### 2.2.17.1. Análisis de Precios Unitarios

Cuando hablamos de precios unitarios nos estamos refiriendo al costo total por unidad de medida, de las actividades propias del proceso de

construcción; esto es, reunir una serie de costos y combinarlos para obtener un resultado que nos dé una idea clara.

Comenzamos por hacer un listado de los materiales que vamos a utilizar y averiguamos el precio de dichos materiales.

Luego averiguamos el precio de la mano de obra que van a ejecutar las actividades propias de la obra. Debemos tener en cuenta entonces, el rendimiento de la mano de obra y el costo de la misma.

En esta investigación, se identificará únicamente el análisis de precios unitarios de la mezcla asfáltica convencional y modificada con polímeros de las diferentes investigaciones recopiladas, para su posterior comparación.

### 2.3. Definición de términos básicos

Asphalt Institute (1982) menciona conceptos brindados a continuación que se han obtenido del Principio de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente:

- CEMENTO ASFÁLTICO: “Un asfalto con flujo o sin flujo, especialmente preparado en cuanto a calidad y consistencia para ser usado directamente en la producción de pavimentos asfálticos”. (Asphalt Institute, 1982, p. 253)
- CONCRETO ASFÁLTICO: “Una mezcla en caliente, muy bien controlada, de cemento asfáltico (de alta calidad), compactada muy bien para formar una masa densa y uniforme.” (Asphalt Institute, 1982, p. 254)
- PENETRACIÓN: “La consistencia de un material bituminoso expresada como la distancia, en décimas de milímetros (0.1 mm), que una aguja patrón penetra verticalmente en una muestra de material, bajo condiciones específicas de carga, tiempo y temperatura.” (Asphalt Institute, 1982, p. 256)
- GRADOS DE PENETRACIÓN: “En los cementos asfálticos es un sistema de clasificación basado en la penetración a una temperatura de 25°C. Existen cinco grados patrones de clasificación: 40-50, 60-70, 85-100, 120-150, y 200-300.” (Asphalt Institute, 1982, p. 256)

## CAPITULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS

### 3.1. Formulación de Hipótesis

#### 3.1.1. Hipótesis General

La adición de polímero entre 1% - 5% mejora el comportamiento mecánico, el desempeño y rentabilidad de la mezcla asfáltica en zonas cálidas.

#### 3.1.2. Hipótesis Específicos

- a) Las fallas de la mezcla asfáltica convencional que predominan en zonas cálidas de Perú son ahuellamiento y fisura.
- b) El polímero que incide en la mejora del comportamiento mecánico y desempeño de la mezcla asfáltica modificada es el SBS, con una adición entre 1% a 5%.
- c) El análisis de Costo-Beneficio de la mezcla asfáltica modificada con polímero SBS indica que es rentable a largo plazo.

### 3.2. Variables

#### 3.2.1. Definición Conceptual de Variables

- Variable independiente: Polímero  
Se analizarán investigaciones donde se realizaron mezclas asfálticas modificadas con polímeros SBS, SBR y EVA, con sus respectivos porcentajes, de tal manera que nos brinde una mezcla asfáltica mejorada.
- Variable dependiente: Comportamiento mecánico, desempeño y rentabilidad de las mezclas asfálticas  
Se identificarán los resultados de los ensayos Marshall, y/o de desempeño de las mezclas asfálticas modificadas con polímeros SBS, SBR y EVA, así como su costo unitario de ambas mezclas asfálticas.

#### 3.2.2. Operacionalización de Variables

En la Tabla N° 11 se verá la Operacionalización de las variables que se utilizaron para esta investigación.

Tabla N° 8: Operacionalización de variables

<b>OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES</b>			
	<b>INDICADORES</b>	<b>INDICES</b>	<b>INSTRUMENTO</b>
<b>VARIABLE DEPENDIENTE</b>			
Polímeros	Cantidad y Tipo de polímero	% Polímero SBS, SBR, EVA	Investigaciones nacionales e internacionales
<b>VARIABLE INDEPENDIENTE</b>			
Fallas en mezclas asfálticas	Propiedades afectadas: Estabilidad y resistencia a la fatiga	Ahuellamiento y Fisuras	Investigaciones nacionales e internacionales
Comportamiento Mecánico y Desempeño	-Ensayo Marshall -Ensayo de Hamburg Wheel Tracking -Ensayo de desgaste -Ensayo de tracción indirecta -Ensayo de módulo de resiliencia -Ensayo de vida fatiga	-Estabilidad y Fluencia -Profundidad de ahuellamiento -Modulo Resiliencia -Porcentaje de desgaste superficial -Resistencia a la Tracción Indirecta -Resistencia a la Fatiga	Investigaciones nacionales e internacionales
Rentabilidad	Precio Unitario	Costo-Beneficio	Investigaciones nacionales e internacionales

Fuente: Elaboración propia

## CAPITULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

### 4.1. Tipo y Nivel

La investigación fue de tipo básica, ya que aportó conocimientos acerca de la mejora que generan polímeros a las mezclas asfálticas. “Los estudios descriptivos buscan especificar las propiedades, las características y los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis”. (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014) Por eso el nivel de investigación fue descriptivo, ya que se evaluó las características de los documentos donde se realizaron investigaciones en zonas cálidas, comparándolos y hallando una relación entre estas.

### 4.2. Diseño de investigación

El diseño de investigación fue, No Experimental ya que se realizó sin manipular deliberadamente variables (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014) y se basó en la información recolectada de trabajos de investigación realizados en la zona de estudio, los cuales no fueron modificados.

### 4.3. Población de Estudio

“Una población es el conjunto de todos los casos que concuerdan con determinadas especificaciones” (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014, p.174). La población estuvo constituida por investigaciones sobre análisis comparativo entre Mezcla asfáltica convencional y Mezclas asfálticas modificadas con polímeros internacionales (2) y nacionales (4).

### 4.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La recolección de datos se hizo por medio investigaciones existentes en zonas cálidas (diseño de mezclas asfálticas, ensayos de laboratorio que determinaron las propiedades mecánicas).

#### 4.4.1. Procedimientos para recolección de datos

- Se eligieron los trabajos de investigación que se realizaron en zonas cálidas.

- Se identificaron los daños más comunes que sufren los pavimentos en zonas cálidas.
- Se eligieron los trabajos de investigación que se utilizaron como asfalto base CAP PEN 60/70 o similar.
- Se escogieron los diseños de mezclas asfálticas que se elaboraron mediante el método de Marshall, para compararlas bajo un mismo tipo de diseño.
- Se identificaron los diferentes tipos de polímeros más usados.
- Se recopiló información de presupuestos elaborados en las investigaciones recopiladas.

#### 4.4.2. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

- Se consideraron zonas cálidas las que presenten temperatura promedio anual de 24° C a más
- Se realizó un cuadro comparativo con los resultados de las investigaciones (Ensayo Marshall, Ensayos de Desempeño y Análisis Comparativo Costo – Beneficio)

## **CAPITULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **5.1. Fallas en mezclas asfálticas convencionales**

A continuación, presentamos una tabla donde resumimos las fallas más resaltantes en mezclas asfálticas convencionales de seis (6) vías ubicadas en zonas cálidas de Perú.

En la Tabla N° 9, identificamos seis vías peruanas ubicadas en zonas que poseen temperaturas entre 16°C a 40°C, las cuales presentan fallas en la carpeta de rodadura (mezcla asfáltica), las más comunes son el ahuellamiento y las fisuras, lo cual indica debilitamiento en las propiedades de estabilidad y resistencia a la fatiga respectivamente.

La mezcla asfáltica al recibir las cargas de los vehículos bajo la acción de las altas temperaturas de la zona provoca que no retorne a su estado original ocasionando deformación permanente, y por ende el deterioro prematuro de la misma.

Por lo tanto, es necesario implementar la mezcla asfáltica modificada con polímeros.

Tabla N° 9: Fallas en mezclas asfálticas en zonas cálidas de Perú

Vías	Ubicación	Características de la zona	Fallas Superficiales	Causas	Propiedades
<b>Tramo 3 Carretera Interoceánica Norte Perú – Brasil</b>	San Martín y Amazonas	-Altitud: 36 msnm. -Clima: cálido. -Temperatura: 18°C a 40°C	-Ahuellamiento en la capa de rodadura, entre 13 y 25 mm. -Fisuras	-Tráfico zonal: Tránsito pesado y lento.  -Factores climáticos: Variación de gradientes térmicos (altas temperaturas)	-Estabilidad.  -Resistencia a la Fatiga.
<b>Tramo 6 Carretera Paíta – Piura y Piura – Olmos</b>	Piura-Lambayeque	-Altitud: 36 msnm. -Clima: tropical seco. -Temperatura: 16°C a 33°C	-Ahuellamiento. Leve, Moderado, Severo. (3-25mm).		-Estabilidad.
<b>Carretera Sullana – Aguas Verdes</b>	Piura-Tumbes	-Altitud: 65 msnm. -Clima: árido cálido. -Temperatura: 17°C a 33°C	-Ahuellamiento -Fisuras de 1mm	-Deficiencia en el proceso constructivo.	-Estabilidad. -Resistencia a la Fatiga.
<b>Carretera Bagua Grande-Cajaruro-Bagua</b>	Amazonas	- Altitud: 470 msnm. -Clima: cálido y lluvioso. -Temperatura: 20°C a 34°C	-Fisura Longitudinal. -Ahuellamiento. -Hundimiento.	-Baja calidad de materiales empleados.	-Resistencia a la Fatiga. -Estabilidad
<b>Avenida Los Tréboles, Chiclayo – Chiclayo - Lambayeque</b>	Lambayeque	-Altitud: 27 msnm. -Clima: subtropical. -Temperatura: 16°C a 31°C	-Fisura. (2-3mm) -Ahuellamiento. (113m2) (12mm). -Desgaste Superficial (4683m2).	-Insuficiencia de mantenimiento	-Estabilidad. -Resistencia a la Fatiga. -Durabilidad.
<b>Av. Francisco Vidal, Huacho-Huaura - Lima</b>	Lima	-Altitud: 30 msnm. -Clima: seco. -Temperatura: 23°C	-Ahuellamiento. (20%) -Fisura. (5%)		-Estabilidad. -Resistencia a la Fatiga.

Fuente: Elaboración propia

5.2. Análisis Comparativo del Comportamiento Mecánico y Desempeño de la Mezcla Asfáltica Convencional (MAC) y Mezcla Asfáltica Modificada con Polímeros (MAMP)

5.2.1. Análisis Comparativo del Comportamiento Mecánico de la Mezcla Asfáltica (Ensayo Marshall)

Hemos seleccionado seis (6) investigaciones sobre mezclas asfálticas modificadas con polímeros tanto nacionales como internacionales (colindantes con Perú), teniendo en común como cemento asfáltico base a modificar el CAP PEN 60/70 o similares, ya que este tipo es usualmente empleado para temperatura media anual de 24°C a más como indica la Tabla N° 5.

Además, en estas investigaciones se analizó el comportamiento mecánico a través del Ensayo Marshall dando como resultado los valores de estabilidad y fluencia de las mezclas asfálticas convencionales y modificadas con polímeros.

Cabe recalcar que los valores de estabilidad y fluencia del ensayo Marshall están basados netamente de las características volumétricas de la mezcla asfáltica.

Tabla N° 10: Análisis Comparativo del Comportamiento Mecánico de mezclas asfálticas (Ensayo Marshall)

Ítem N°	Investigación	País	Cemento Asfáltico Base	Tipo y % Polímero	Ensayo Marshall	Und.	MAC	MAMP (SBS)	MAMP (SBR)	MAMP (EVA)
1	"Análisis del Comportamiento de una Mezcla Asfáltica Modificada con Polímeros SBS Betutec IC y una Mezcla Asfáltica Convencional 60/70"	Perú	PEN 60/70	SBS 3.50%	Estabilidad	Kgf	1373	1964	-	-
					Flujo	mm	3.47	3.33	-	-
2	"Estudio Comparativo del Método Convencional y Uso de los Polímeros EVA y SBS en la Aplicación de Mezclas asfálticas"	Perú	PEN 60/70	SBS 4.00%	Estabilidad	Kgf	1220	1869	-	1432
				EVA 3.00%	Flujo	mm	2.60	2.70	-	2.10
3	"Análisis Comparativo del Comportamiento Mecánico de una Mezcla Asfáltica Modificada con Betutec IC + Aditivo Warmix respecto a la Mezcla Asfáltica Convencional"	Perú	PEN 60/70	SBS 3.50%	Estabilidad	Kgf	1360	1770	-	-
					Flujo	mm	3.33	3.42	-	-

4	"Evaluación de estabilidad de la mezcla asfáltica en caliente utilizando aditivo SBS, Trujillo – La Libertad"	Perú	PEN 60/70	SBS	4.95%	Estabilidad	Kgf	1075.8	1817.13	-	-
						Flujo	mm	3.5	3.60	-	-
5	"Caracterización de Mezclas Asfálticas en Caliente, elaboradas con el Uso de Cemento Asfáltico Modificado con Polímero SBR y SBS"	Ecuador	AC - 20 (equivalente a PEN 60/70, ver Anexo 9, Tabla N° 25)	SBS	2.00%	Estabilidad	Kgf	927.6	1118.56	1068.66	-
				SBR	1.00%	Flujo	mm	2.28	2.54	3.04	-
6	"Evaluación de mezclas producidas con Ligantes Asfálticos peruanos convencional PEN 60/70 y modificado por polímeros SBS tipo I 60/60 y PG 76-22"	Brasil	PEN 60/70	SBS	No específica	Estabilidad	Kgf	$\frac{S^*=1631.4}{C^{**}=1753.8}$	$\frac{S=2304.4}{C=2263.6}$	-	-
						Flujo	mm	$S = 3.7$	$S = 3.2$	-	-
								$C = 4.0$	$C = 3.6$	-	-

(\*) sin envejecimiento a 25°C

(\*\*) con 4 horas de envejecimiento a 25°C

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla N° 10, se observa que el polímero más utilizado para la modificación de la mezcla asfáltica es el SBS. Además, el porcentaje de adición utilizado en estas mezclas asfálticas modificadas con SBS varían entre 2.00 % y 4.95%.

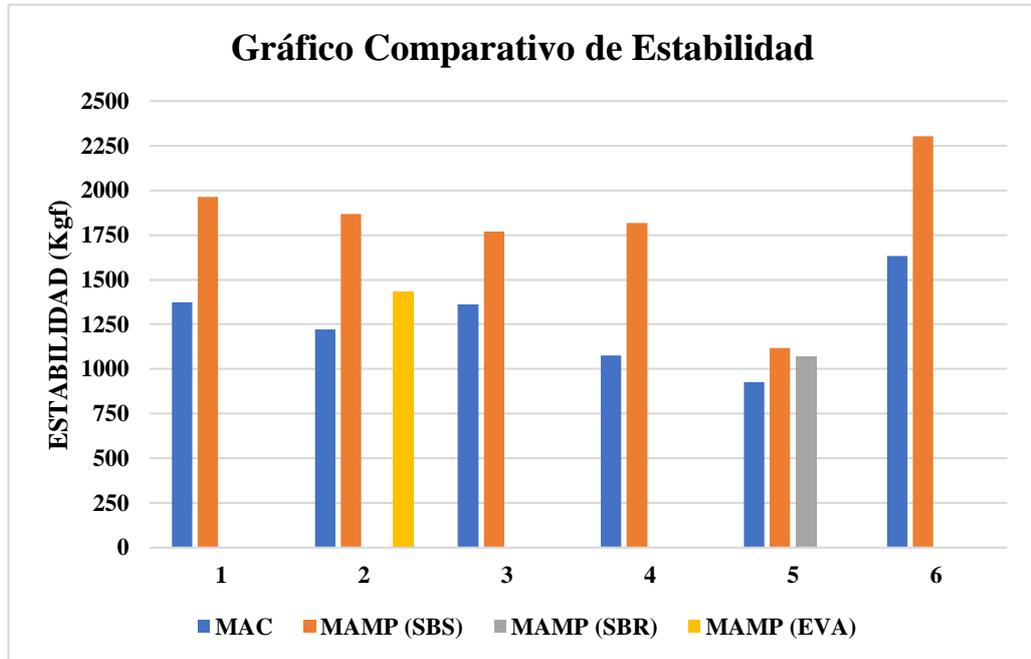


Figura N° 20: Gráfico comparativo de Estabilidad de las investigaciones  
Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 11: Incremento de Estabilidad de mezclas asfálticas modificadas con polímeros respecto a la mezcla asfáltica convencional

Ítem N°	% Incremento de Estabilidad		
	MAMP (SBS)	MAMP (SBR)	MAMP (EVA)
1	43.04%	-	-
2	53.20%	-	17.38%
3	30.15%	-	-
4	68.91%	-	-
5	20.59%	15.21%	-
6	S: 41.25%	-	-
	C: 29.07%	-	-

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura N° 10 se aprecia que al modificar las mezclas asfálticas con polímeros incrementan considerablemente los valores de Estabilidad como se detalla en la Tabla N° 11 incrementan entre 17 - 68%, siendo este un indicio positivo ya que el valor de estabilidad nos indica la carga máxima que puede soportar la mezcla asfáltica antes de que falle totalmente.

En la Tabla N° 10 también se observan los valores de fluencia de las mezclas asfálticas modificadas con SBS y SBR los cuales no varían mucho respecto a la mezcla asfáltica convencional. Sin embargo, en el ítem 2 se aprecia que la mezcla asfáltica modificada con polímero EVA sufre una disminución de la fluencia (2.1 mm) cerca al valor mínimo permitido (Tabla 8) y a su vez un incremento de estabilidad, este resultado nos indica que es una mezcla demasiado frágil y rígida para un pavimento en servicio.

#### 5.2.2. Análisis Comparativo de Desempeño de la Mezcla Asfáltica

De las seis (6) investigaciones sobre mezclas asfálticas modificadas con polímeros tanto nacionales como internacionales (colindantes con Perú) mencionadas en el 5.2.1., sólo 3 investigaciones de ellas realizaron ensayos de desempeño.

Se evalúa el desempeño de la mezcla asfáltica mediante ensayos que simulan las condiciones de campo en la que la mezcla asfáltica está expuesta.

Los ensayos que se realizaron en las investigaciones fueron los siguientes: ensayo de Hamburg Wheel Tracking (caracteriza el desempeño frente a las deformaciones permanentes), ensayo de desgaste (mide la durabilidad de la mezcla), ensayo de tracción indirecta (determina la resistencia a la compresión diametral), ensayo de módulo de resiliencia (verifica la variación del comportamiento elástico con la variación de la temperatura) y ensayo de vida fatiga (determina la resistencia máxima antes cargas cíclicas a diferentes temperaturas).

Tabla N° 12: Resultados de Ensayos de Desempeño de las Mezclas Asfálticas

Ítem N°	Investigación	País	Cemento Asfáltico Base	Tipo y % Polímero	Desempeño (ensayos)	Medición	MAC	MAMP (SBS)	MAMP (SBR)
1	"Análisis del Comportamiento de una Mezcla Asfáltica Modificada con Polímeros SBS Betutec IC y una Mezcla Asfáltica Convencional 60/70"	Perú	PEN 60/70	SBS 3.50%	Ensayo de Hamburg Wheel Tracking	Profundidad de ahuellamiento (mm)	7.77	1.80	-
4	"Caracterización de Mezclas Asfálticas en Caliente, elaboradas con el Uso de Cemento Asfáltico Modificado con Polímero SBR y SBS"	Ecuador	AC - 20 (equivalente a PEN 60/70, ver Anexo 9, Tabla N° 25)	SBS 2.00%	Ensayo Desgaste	Porcentaje de desgaste (%)	2.60	2.10	1.80
				SBR 1.00%	Ensayo Tracción Indirecta	Tracción indirecta (kg/cm2)	2.69	7.74	3.71
5	"Evaluación de mezclas producidas con Ligantes Asfálticos peruanos convencional PEN 60/70 y modificado por polímeros SBS tipo I 60/60 y PG 76-22"	Brasil	PEN 60/70	SBS No específica	Ensayo módulo de resiliencia	Módulo resiliente (Kgf/cm2)	S= 21770.9 4	S= 23810.37	-
					Ensayo vida fatiga	N	S= 7411 C=15894	S= 23131 C=49588	-

Fuente: Elaboración propia

En el ítem 1 de la Tabla N° 12 se observa los resultados del ensayo de Hamburg Wheel Tracking aplicados en la mezcla asfáltica convencional y mezcla asfáltica modificada con polímero SBS, los cuales presentaron profundidades de ahuellamiento de 7.77 mm y 1.80 mm respectivamente, luego de haber recibido 20,000 pasadas de la Rueda de Hamburgo sumergidos en agua a 50°C.



Figura N° 21: Imágenes de probetas de ambas mezclas asfálticas (antes y después del ensayo de Rueda de Hamburgo)  
Fuente: Villafana & Ramírez (2019)

La magnitud de ahuellamiento de la mezcla asfáltica es moderada mientras que la mezcla asfáltica modificada con polímero SBS es escasa de acuerdo a la Tabla N° 6.

Estos resultados son muy positivos ya que la profundidad de ahuellamiento reduce hasta un 76.83%, siendo este el problema principal de las mezclas asfálticas en zonas cálidas.

En el ítem 4 de la Tabla N° 12 se observan los resultados del ensayo de desgaste que consistió en ingresar las probetas en la máquina de Los Ángeles y tracción indirecta que consistió en aplicar compresión diametral a las probetas de la

mezcla asfáltica convencional y a las mezclas asfálticas modificadas con polímeros SBS y SBR.

Los porcentajes de desgaste fueron los siguientes: 2.60%(MAC), 2.10%(MAMP-SBS) y 1.80%(MAMP-SBR). Lo cual nos indica una mayor adherencia de los agregados con el cemento asfáltico modificado, es decir, presenta mejoría en la propiedad de durabilidad de la mezcla asfáltica.

Los resultados del Tracción indirecta fueron los siguientes: 2.69 kg/cm<sup>2</sup> (MAC), 7.74 kg/cm<sup>2</sup>(MAMP-SBS) y 3.71 kg/cm<sup>2</sup> (MAMP-SBR). Lo cual nos indica que la mezcla asfáltica modificada con polímeros nos da una mayor resistencia a tensiones de tracción, en este caso el polímero SBS es quien encabeza el mejor resultado con un incremento de 187.73% respecto a la mezcla convencional, mientras que el polímero SBR un incremento de 37.92%.

En el ítem 5 de la Tabla N° 12 se observan los resultados del ensayo de módulo resiliente y de vida fatiga que se realizaron a la mezcla asfáltica convencional y a la mezcla asfáltica modificada con polímero SBS.

Los resultados del ensayo de módulo resiliente fueron los siguientes:

Para la mezcla asfáltica convencional sin envejecimiento a 25°C se obtuvo 21770.94 kg/cm<sup>2</sup> y con 4 horas de envejecimiento a 25°C se obtuvo 58633.68 kg/cm<sup>2</sup>. Para la mezcla asfáltica modificada con polímero SBS sin envejecimiento a 25°C se obtuvo 23810.37 kg/cm<sup>2</sup> y con 4 horas de envejecimiento a 25°C se obtuvo 63110.24 kg/cm<sup>2</sup>. Lo cual nos indica que la mezcla modificada con polímero SBS proporciona un mayor módulo de resiliencia por ende una mejor resistencia a las cargas cíclicas a una temperatura de 25°C (Figura N° 22).

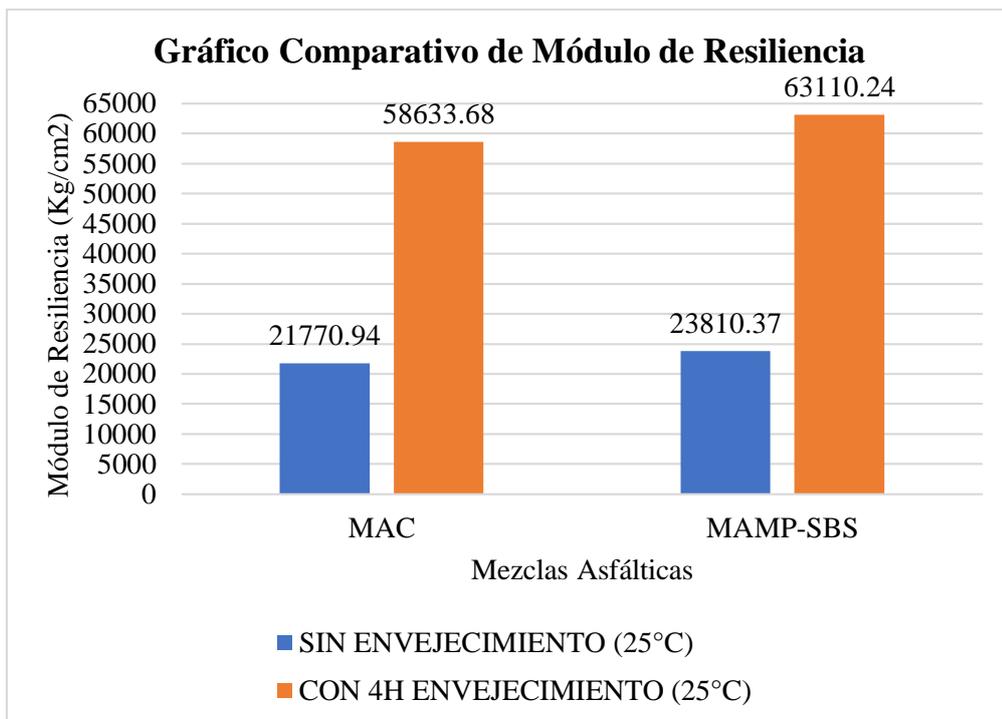


Figura N° 22: Gráfico Comparativo de Módulo de Resiliencia  
Fuente: Elaboración propia

Los resultados del ensayo de vida de fatiga por compresión diametral fueron los siguientes:

Para la mezcla asfáltica convencional sin envejecimiento se obtuvo 4377 N y con 4 horas de envejecimiento se obtuvo 6523 N. Para la mezcla asfáltica modificada con polímero SBS sin envejecimiento se obtuvo 12720 N y con 4 horas de envejecimiento se obtuvo 16222 N. Lo cual nos indica que la mezcla modificada con polímero SBS proporciona mejores resultados de vida de fatiga siendo hasta dos o tres veces mayores que los resultados con mezcla asfáltica convencional, lo cual nos indica una mayor vida útil.

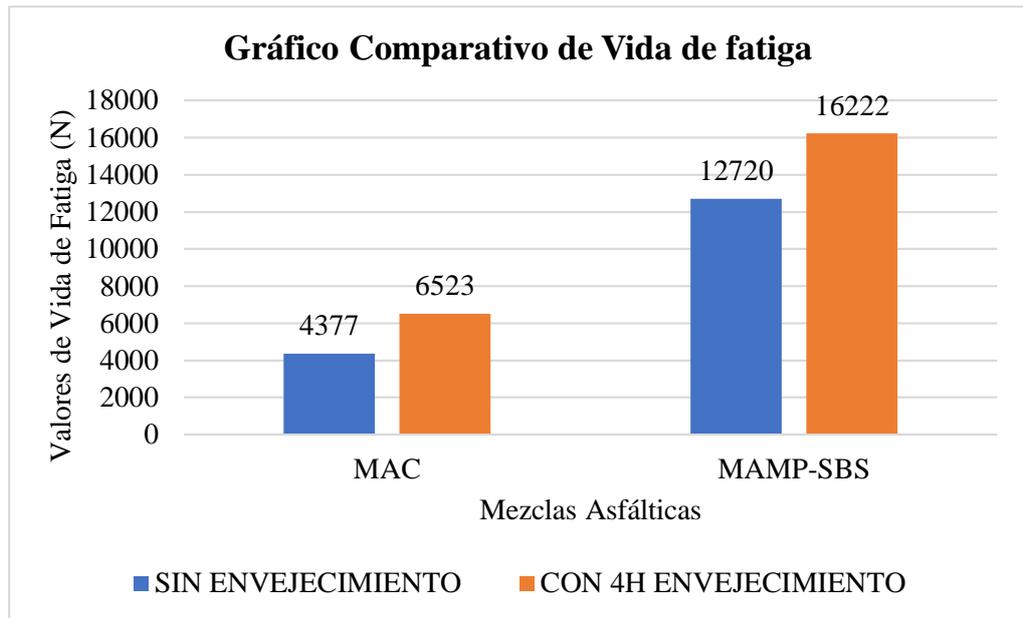


Figura N° 23: Gráfico Comparativo de Vida de fatiga  
Fuente: Elaboración propia

### 5.3. Análisis Comparativo Costo-Beneficio de las mezclas asfálticas

De las investigaciones analizadas, sólo dos de ellas presentan análisis de precios unitarios de los cuales tomamos como referencia para la comparación de costos entre las mezclas asfálticas. Las cuales presentamos en la siguiente Tabla N° 13. De la Tabla N° 13, el ítem 3 se observa que el costo inicial por m<sup>3</sup> de la mezcla asfáltica modificada con polímero SBS excede en un 32.35% como se detalla en la Figura N° 24.

Tabla N° 13: Cuadro comparativo de Análisis de Precios Unitarios

Ítem N°	Investigación	País	Año	Medición de Costo Inicial	Und.	Moneda	MONTO		
							MAC	MAMP (SBS)	MAMP (SBR)
3	"Análisis Comparativo del Comportamiento Mecánico de una Mezcla Asfáltica Modificada con Betutec IC + Aditivo Warmix respecto a la Mezcla Asfáltica Convencional"	Perú	2018	Análisis de Precios unitarios	m3	soles	340.00	450.00	-
5	"Caracterización de Mezclas Asfálticas en Caliente, elaboradas con el Uso de Cemento Asfáltico Modificado con Polímero SBR y SBS"	Ecuador	2019	Análisis de Precios unitarios	m2	soles	41.61	52.16	48.18

Fuente: Elaboración propia

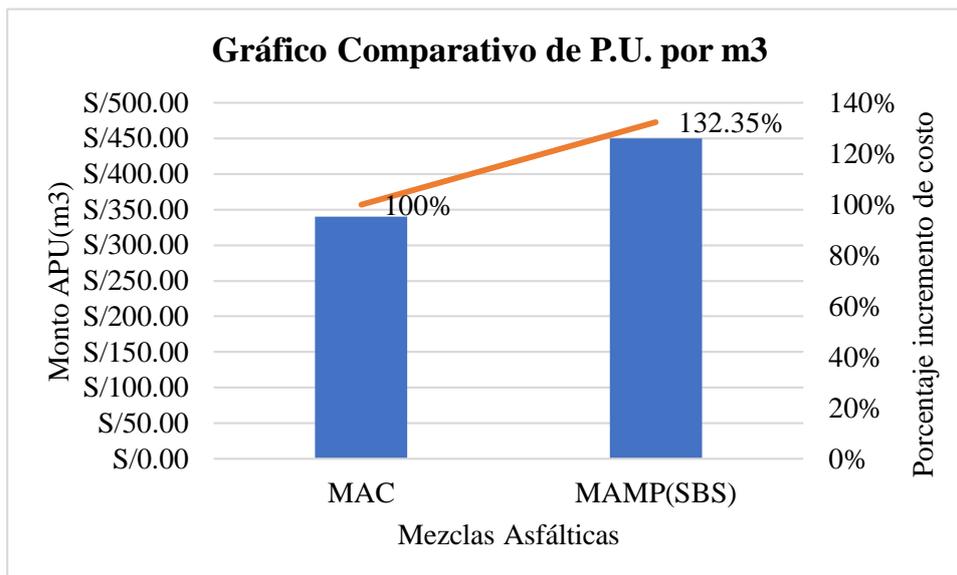


Figura N° 24: Gráfico Comparativo de Precio Unitario por m3 entre la MAC y MAMP(SBS)

Fuente: Elaboración propia

De la Tabla N° 13, en el ítem 5 se observa que el costo inicial por m2 de la mezcla asfáltica modificada con polímero SBS excede en un 25.35% mientras que la mezcla asfáltica modificada con polímero SBR excede en un 15.80% como se detalla en la Figura N° 25.

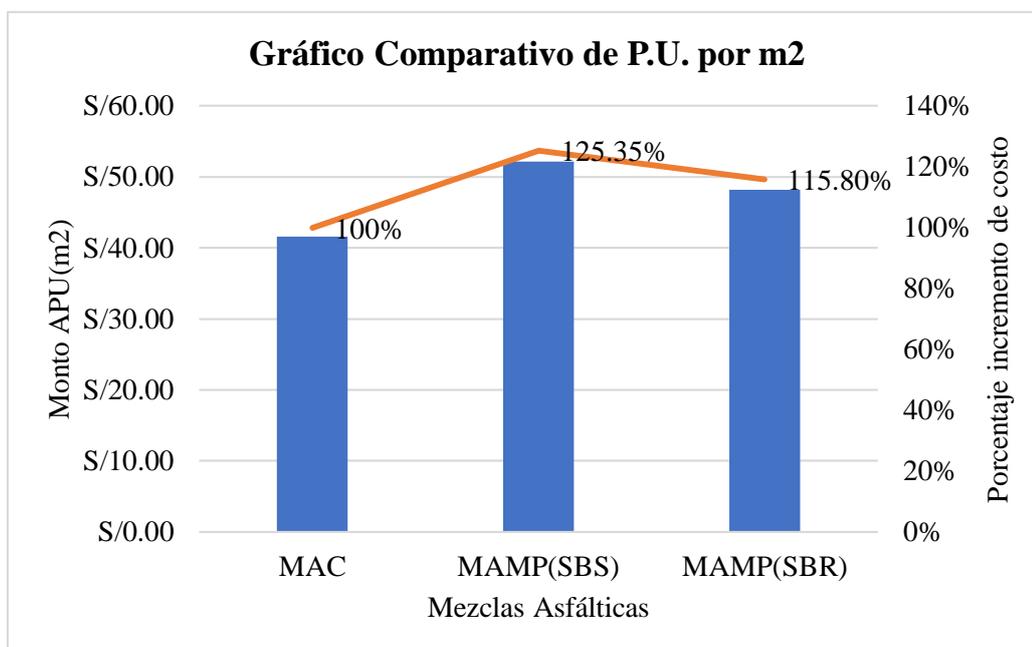


Figura N° 25: Gráfico Comparativo de Precio Unitario por m2 de la MAC, MAMP(SBS) y MAMP(SBR)

Fuente: Elaboración propia

A raíz de los costos mencionados líneas arriba se estima que el incremento de costo inicial de las mezclas asfálticas modificadas varía entre 15% a 33% respecto a la mezcla asfáltica convencional. Los cuales se equilibran a largo plazo debido a la mejora significativa que tienen en su comportamiento mecánico y desempeño mostrado en el 5.2 del presente capítulo. Además, se presenta un resumen de los beneficios del polímero SBS en la Tabla N° 14.

Tabla N° 14: Beneficios de la Mezcla Asfáltica Modificada con Polímero SBS

<b>MEZCLA ASFÁLTICA CON POLÍMERO SBS</b>		
<b>ANÁLISIS</b>	<b>VALORES</b>	<b>BENEFICIOS</b>
<b>COMPORTAMIENTO MECANICO</b>	Estabilidad	Incremento de estabilidad de (17 a 68) %
	Fluencia	Mantiene valores similares a la mezcla convencional
<b>DESEMPEÑO</b>	Ahuellamiento	Reducción de profundidad de ahuellamiento hasta un 76.83%
	Desgaste Superficial	Reducción de desgaste superficial en 0.50%
	Resistencia a Tracción Indirecta	Incremento de Resistencia a Tracción Indirecta 187.73%
	Módulo Resiliente	Incremento de módulo resiliente de 9.37% (sin envejecimiento a 25°C) y 7.63% (con 4h de envejecimiento a 25°C)
	Vida de Fatiga	Incremento de vida de fatiga hasta 2 o 3 veces mayores

Fuente: Elaboración

## 5.4. Contrastación de Hipótesis

### 5.4.1. Hipótesis específica 1

Hipótesis Alternativa (Hi1): Las fallas de la mezcla asfáltica convencional que predominan en zonas cálidas de Perú son ahuellamiento y fisura.

Hipótesis Nula (Ho1): Las fallas de la mezcla asfáltica convencional que no predominan en zonas cálidas de Perú son ahuellamiento y fisura.

De acuerdo a la identificación de las fallas de mezclas asfálticas convencionales en zonas cálidas de Perú detalladas en la Tabla N° 9, se observa que en las seis vías mostradas presentan fallas de ahuellamiento y fisura, mientras que solo en una vía además de esas fallas, se identificó el desgaste superficial.

Por ende, Hi1 es válido.

### 5.4.2. Hipótesis específica 2

Hipótesis Alternativa (Hi2): El polímero que incide en la mejora del comportamiento mecánico y desempeño de la mezcla asfáltica modificada es el SBS, con una adición entre 1% a 5%.

Hipótesis Nula (Ho2): El polímero que no incide en la mejora del comportamiento mecánico y desempeño de la mezcla asfáltica modificada es el SBS, con una adición entre 1% a 5%.

De acuerdo al análisis del comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas mediante la comparación de valores de estabilidad y fluencia, se determina que las mezclas asfálticas modificadas con polímeros SBS y SBR brindan una mejora significativa en su comportamiento mecánico ya que tienen mayor estabilidad y su fluencia tiene un incremento mínimo respecto a la mezcla asfáltica convencional. A diferencia del uso del polímero EVA ya que tiene una mayor estabilidad, sin embargo, su fluencia disminuye muy cerca al límite inferior permitido (Tabla N° 4), lo cual la hace una mezcla asfáltica demasiado frágil y rígida, por lo tanto, el uso del polímero EVA queda descartado.

De acuerdo al análisis del Desempeño de las mezclas asfálticas mediante la comparación de los resultados de los ensayos de desempeño, se determina que las mezclas asfálticas modificadas con polímeros SBS y SBR brindan una mejora significativa respecto a la mezcla asfáltica convencional.

A nivel de deformación permanente, se observa la reducción de profundidad de ahuellamiento de hasta un 76.83% al utilizar polímero SBS, detallada en el ítem 1 de la Tabla N° 12.

De acuerdo a los resultados de desgaste superficial, se aprecia la reducción de desgaste de las mezclas asfálticas modificadas con polímeros SBS y SBR mostrada en el ítem 4 de la Tabla N° 12. Cabe mencionar que el desgaste superficial de la mezcla no es una falla que predomine en zonas cálidas, pero es bueno tener conocimiento que de todas maneras proporciona una mejora en la propiedad de durabilidad, debido a una mejor adherencia con los agregados gracias a la utilización de polímeros.

De acuerdo a los resultados del ensayo de tracción indirecta de las mezclas asfálticas modificadas con polímeros SBS y SBR mostrados en el ítem 4 de la Tabla N° 12, nos indica que la mezcla asfáltica modificada con polímeros nos da una mayor resistencia a tensiones de tracción, en este caso el polímero SBS es quien encabeza el mejor resultado con un incremento de 187.73% respecto a la mezcla convencional, mientras que el polímero SBR un incremento de 37.92%.

De acuerdo a los resultados del ensayo de modulo resiliente y de vida fatiga que se realizaron a la mezcla asfáltica convencional y a la mezcla asfáltica modificada con polímero SBS mostrados en el ítem 5 de la Tabla N° 12, indica que la mezcla modificada con polímero SBS proporciona un mayor módulo de resiliencia, es decir, una mejor resistencia a las cargas cíclicas a una temperatura de 25° (Figura N° 22). También indica que la mezcla modificada con polímero SBS proporciona mejores resultados de vida de fatiga siendo hasta dos o tres

veces mayores que los resultados con mezcla asfáltica convencional, lo cual nos indica una mayor vida útil.

Asimismo, cabe recalcar que, en las investigaciones analizadas tanto para el comportamiento mecánico como el desempeño de las mezclas asfálticas, el polímero que con mayor incidencia para la modificación de la mezcla asfáltica es el SBS con porcentajes de adición del 2%, 3%, 3.5%, 4% y 4.95%; mientras que el SBR (menor incidencia) con porcentaje de adición de 1%. Los cuales se encuentran comprendidos entre el 1% - 5% como se planteó inicialmente.

Por ende, Hi2 es válido.

#### 5.4.3. Hipótesis específica 3

Hipótesis Alternativa (Hi3): El análisis de Costo-Beneficio de la mezcla asfáltica modificada con polímero SBS indica que es rentable a largo plazo.

Hipótesis Nula (Ho3): El análisis de Costo-Beneficio de la mezcla asfáltica modificada con polímero SBS indica que no es rentable a largo plazo.

De acuerdo al análisis de Beneficio-Costo de la mezcla asfáltica modificada con polímero SBS, el precio unitario inicial es mayor entre 15% a 33% respecto a la mezcla asfáltica convencional. Este incremento es compensado a largo plazo gracias a los beneficios (Tabla 26) que brinda la mezcla asfáltica modificada con polímero SBS tanto en su comportamiento mecánico y su desempeño.

Por ende, Hi3 es válido.

#### 5.4.4. Hipótesis General

Debido a la validez de las hipótesis específicas alternas contrastadas líneas arriba, la hipótesis general (“La adición de polímero entre 1% - 5% mejora el comportamiento mecánico, el desempeño y rentabilidad de la mezcla asfáltica en zonas cálidas.”)

planteada inicialmente es válida.

## CONCLUSIONES

1. La adición de polímero entre 1% - 5% influye en la mejora del comportamiento mecánico, el desempeño y rentabilidad de la mezcla asfáltica en zonas cálidas de Perú, respecto a la mezcla asfáltica convencional. Pues a partir de los análisis de los resultados de los ensayos Marshall se obtuvo una mayor estabilidad, es decir mayor capacidad de carga de la mezcla asfáltica sin disminuir su fluencia. Y mediante los análisis de los resultados de los ensayos de desempeño se obtuvo reducción significativa de la profundidad de ahuellamiento, ligera disminución del desgaste superficial, mayor resistencia a la tracción indirecta, incremento del módulo resiliente e incremento de la vida de fatiga hasta 2 o 3 veces. Teniendo como porcentaje de adición de los polímeros SBS y SBR dentro del rango planteado.
2. Las fallas de la mezcla asfáltica convencional que predominan en zonas cálidas de Perú son ahuellamiento y fisura, las cuales indican debilitamiento de las propiedades de estabilidad y resistencia a la fatiga respectivamente, que se muestran en la Tabla N° 9. Debido a ello es necesario la modificación de la mezcla asfáltica convencional para la mejora de sus propiedades.
3. El polímero que incide en la mejora del comportamiento mecánico y desempeño de la mezcla asfáltica modificada es el SBS, con una adición entre 1% a 5%, ya que en las investigaciones analizadas tanto para el comportamiento mecánico como el desempeño de las mezclas asfálticas, el polímero con mayor incidencia para la modificación de la mezcla asfáltica es el SBS con porcentajes de adición del 2%, 3%, 3.5%, 4% y 4.95%; mientras que el SBR (menor incidencia) con porcentaje de adición de 1% y 3.5% .

De acuerdo al análisis del comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas mediante la comparación de valores de estabilidad y fluencia, se determina que las mezclas asfálticas modificadas con polímeros SBS y SBR brindan una mejora significativa en su comportamiento mecánico ya que tienen mayor estabilidad y su fluencia tiene un incremento mínimo respecto a la mezcla asfáltica convencional. A diferencia del uso del polímero EVA ya que tiene una mayor estabilidad, sin embargo, su fluencia disminuye muy cerca al límite inferior permitido (Tabla 8), lo

cual la hace una mezcla asfáltica demasiado frágil y rígida, por lo tanto, el uso del polímero EVA queda descartado.

De acuerdo al análisis de desempeño de las mezclas asfálticas mediante la comparación de los resultados de los ensayos de desempeño, se determina que las mezclas asfálticas modificadas con polímeros SBS y SBR brindan una mejora significativa respecto a la mezcla asfáltica convencional. A nivel de deformación permanente, se observa la reducción de profundidad de ahuellamiento de hasta un 76.83% al utilizar polímero SBS, detallada en el ítem 1 de la Tabla N° 12.

De acuerdo a los resultados de desgaste superficial, se aprecia la reducción de desgaste de las mezclas asfálticas modificadas con polímeros SBS y SBR mostrada en el ítem 4 de la Tabla N° 12. Cabe mencionar que el desgaste superficial de la mezcla no es una falla que predomine en zonas cálidas, pero es bueno tener conocimiento que de todas maneras proporciona una mejora en la propiedad de durabilidad, debido a una mejor adherencia con los agregados gracias a la adición de polímeros.

De acuerdo a los resultados del ensayo de tracción indirecta de las mezclas asfálticas modificadas con polímeros SBS y SBR mostrados en el ítem 4 de la Tabla N° 12, nos indica que la mezcla asfáltica modificada con polímeros nos da una mayor resistencia a tensiones de tracción, en este caso el polímero SBS es quien encabeza el mejor resultado con un incremento de 187.73% respecto a la mezcla convencional, mientras que el polímero SBR un incremento de 37.92%.

De acuerdo a los resultados del ensayo de módulo resiliente y de vida fatiga que se realizaron a la mezcla asfáltica convencional y a la mezcla asfáltica modificada con polímero SBS mostrados en el ítem 5 de la Tabla N° 12, indica que la mezcla modificada con polímero SBS proporciona un mayor módulo de resiliencia, es decir, una mejor resistencia a las cargas cíclicas a una temperatura de 25° (Figura N° 22). También indica que la mezcla modificada con polímero SBS proporciona mejores resultados de vida de fatiga siendo hasta dos o tres veces mayores que los

resultados con mezcla asfáltica convencional, lo cual nos indica una mayor vida útil.

4. Según el análisis de Costo-Beneficio de la mezcla asfáltica modificada con polímero SBS y SBR indica que es rentable a largo plazo. Ya que el incremento del precio unitario inicial respecto a la mezcla asfáltica convencional es compensado a largo plazo gracias a los beneficios (Tabla N° 14) que brinda la mezcla asfáltica modificada con polímero SBS tanto en su comportamiento mecánico y su desempeño.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar investigaciones para evaluar el estado situacional de las carreteras que se encuentran en zonas cálidas y así mostrar la realidad vial del país a nivel macro, y así darle la importancia debida de implementar esta tecnología, evitando interrupciones en la transitabilidad que causan tanto los deterioros como los mantenimientos prematuros.
2. Se recomienda realizar investigaciones donde se realicen diferentes ensayos de desempeño para mezclas asfálticas modificadas con polímeros SBS y SBR, así como también su respectivo análisis económico para enriquecer la demostración de los beneficios que brinda esta tecnología. Ya que en esta investigación nos limitamos a las pocas investigaciones existentes.
3. Se recomienda realizar investigaciones donde se realicen aplicaciones en campo, realizando la colocación de mezcla asfáltica en un tramo de carretera en diferentes departamentos con clima cálido, y que eso sea una puerta para próximas investigaciones de evaluación de vida útil.
4. Se recomienda realizar ensayos de desempeño, en todos los proyectos de pavimentos flexibles, ya que es una forma de simular la realidad a la que está expuesta la mezcla asfáltica, y así optimizar el diseño de las mismas.
5. En la actualidad no existe un diseño estipulado para este tipo de mezclas modificadas, ya que los porcentajes óptimos de polímeros que se emplean varían debido a diferentes factores como la compatibilidad con el asfalto a modificar, tipo de agregados, temperaturas para lo cual serán expuestas o las propiedades que se buscan reforzar, entre otros, por ende, se recomienda evaluar particularmente cada diseño que se realice de estas mezclas asfálticas modificadas para obtener su propio porcentaje óptimo de adición de polímero, teniendo como referencia el rango de 1% a 5%.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, M. M., & Herrera, L. J. (2016). *Uso de polímeros tipo III para mejorar la durabilidad y el comportamiento de las mezclas asfálticas (MDC-19) empleadas en zonas cálidas*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11227/5757>
- Alvines, P. J. (2018). *Evaluación de la Condición Superficial del Pavimento Flexible de la Carretera Bagua Grande-Cajaruro - Bagua, Km 5+000 al Km 8+000, Anazonas, 2018*. Obtenido de <http://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/UNTRM/1646/Alvines%20P%C3%A9rez%20Juan%20Carlos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Asphalt Institute. (1982). *Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente*. Obtenido de <https://vdocuments.mx/ms-22-principios-de-construccion-de-pavimentos-de-mezcla-asfalticas.html>
- Avellán, C. M. (2007). *Asfaltos modificados con polímeros*. Obtenido de [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_2705\\_C.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2705_C.pdf)
- Bonilla, N., Rivera, J., Díaz, R., Cobaleda, D., Bolívar, O., & Escobar, M. (1991). *Costos, Presupuesto y Programación*. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11404/5535>
- Borja, T. S., & Cárdenas, C. J. (2019). *Caracterización de Mezclas Asfálticas en Caliente, elaboradas con el uso de Cemento Asfáltico Modificado con Polímero SBR y SBS*. Obtenido de <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/18757>
- Bustos, C. H., Sosa, M. P., Rodríguez, R. N., & Calderón, B. J. (2018). *Fundamentos Micro Y Macroscópicos de la Modificación del Asfalto Convencional con Polímeros: Una Revisión*. Obtenido de <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.13.24.2018.58-77>
- Cahuana, H. P., & Limas, S. H. (2018). *Análisis Comparativo del Comportamiento Mecánico de una Mezcla Asfáltica Modificada con Betutes IC + Aditivo Warmix respecto a la Mezcla Asfáltica Convencional*. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12727/4016>

- Canevarolo, J. S. (2006). *Ciencia dos polímeros* (Segunda ed.). Artliber. Obtenido de [http://www.ifba.edu.br/professores/iarasantos/QUI%20541\\_Qu%C3%ADmica%20de%20pol%C3%ADmeros/Livros/Cie%CC%82ncia%20dos%20polimeros%20-%20Canevarolo%20Jr.,%20Sebastiao%CC%83o%20V..pdf](http://www.ifba.edu.br/professores/iarasantos/QUI%20541_Qu%C3%ADmica%20de%20pol%C3%ADmeros/Livros/Cie%CC%82ncia%20dos%20polimeros%20-%20Canevarolo%20Jr.,%20Sebastiao%CC%83o%20V..pdf)
- Cavalcante, L. M. (2005). *Caracterização Química e Reológica de Asfaltos Modificados por Polímeros*. Obtenido de <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/2080>
- Escalante, Z. J. (2007). *Evaluación de mezclas producidas con Ligantes Asfálticos peruanos convencional PEN 60/70 y modificado por polímeros SBS tipo I 60/60 E PG 76-22*. Obtenido de <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-26042007-173415/publico/Zegarra2007.pdf>
- Estrada, E. V. (2017). *Estudio y análisis de desempeño de mezcla asfáltica convencional PEN 85/100 plus y mezcla asfáltica modificada con polímero tipo SBS PG 70-28*. Obtenido de <http://repositorio.uandina.edu.pe/handle/UAC/1057>
- Fernandez, V. V. (2019). *Evaluación de las Fallas Estructurales del Pavimento Flexible de la Avenida Francisco Vidal, Huacho*. Obtenido de <http://repositorio.unjfsc.edu.pe/bitstream/handle/UNJFSC/4002/VICTOR.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Figuroa, I. A., Reyes, L. F., Hernández, B. D., Jiménez, C., & Bohórquez, N. (2007). Análisis de un asfalto modificado con icopor y su incidencia en una mezcla asfáltica densa en caliente. *Ingeniería e Investigación*, 27, 7(3), 5-15. Obtenido de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/ingainv/article/view/14840>
- Flores, A. S., & Monzón, R. Y. (2020). *Evaluación de Estabilidad de la Mezcla Asfáltica en Caliente Utilizando Aditivo SBS, Trujillo – La Libertad*. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12692/46893>
- Goicochea, F. F. (2019). *Estudio de un asfalto con adición de caucho de neumático reciclado como polímero base, Chachapoyas-Amazonas-2017*. Obtenido de <http://repositorio.untrm.edu.pe/handle/UNTRM/1627>

- Hernández, S. R., Fernández, C. C., & Baptista, L. P. (2014). *Metodología de la Investigación*. Obtenido de [http://euaem1.uaem.mx/bitstream/handle/123456789/2776/506\\_6.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://euaem1.uaem.mx/bitstream/handle/123456789/2776/506_6.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Huamán, G. N., & Chang, A. C. (2015). La deformación permanente en las mezclas asfálticas y el consecuente deterioro de los pavimentos asfálticos en el Perú. *Perfiles de ingeniería*, *II*(11), 23-31. doi:[https://doi.org/10.31381/perfiles\\_ingenieria.v2i11.402](https://doi.org/10.31381/perfiles_ingenieria.v2i11.402)
- Ibañez, M. W. (2015). *Uso de polímeros en un nuevo diseño para mejorar las propiedades físico-mecánicas del asfalto: Contribución para para el tramo de la carretera Chilete-Cajamarca*. Obtenido de <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/UNC/1639>
- Infante, A. C., & Vásquez, A. D. (2016). *Estudio Comparativo del método Convencional y Uso de los Polímeros EVA y SBS en la Aplicación de Mezclas Asfálticas*. Obtenido de <http://repositorio.uss.edu.pe/handle/uss/2253>
- López, J. S., & Veloz, V. Y. (2013). *Análisis Comparativo de Mezclas Asfálticas Modificadas con Polímeros SBR y SBS, con Agregados Provenientes de la Cantera de Guayllabamba*. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/6533>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). *Especificaciones Técnicas Generales para Construcción*. Obtenido de EG-2013, MTC, Perú: [http://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/documentos/manuales/MANUALES%20DE%20CARRETERAS%202019/MC-01-13%20Especificaciones%20Tecnicas%20Generales%20para%20Construcci%C3%B3n%20-%20EG-2013%20-%20\(Versi%C3%B3n%20Revisada%20-%20JULIO%202013](http://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/MANUALES%20DE%20CARRETERAS%202019/MC-01-13%20Especificaciones%20Tecnicas%20Generales%20para%20Construcci%C3%B3n%20-%20EG-2013%20-%20(Versi%C3%B3n%20Revisada%20-%20JULIO%202013)
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). *Manual de Carreteras: Suelos Geología, Geotecnia y Pavimentos*. Obtenido de [https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/MTC%20NORMAS%20ARCH\\_PDF/MAN\\_7%20SGGP-2014.pdf](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS%20ARCH_PDF/MAN_7%20SGGP-2014.pdf)

- Montejo, F. A. (2002). *Ingeniería de pavimentos para carreteras* (Segunda ed.). Universidad católica de Colombia. Obtenido de [https://www.academia.edu/22782711/Ingenieria\\_de\\_pavimentos\\_-\\_Alfonso\\_Montejo\\_Fonseca](https://www.academia.edu/22782711/Ingenieria_de_pavimentos_-_Alfonso_Montejo_Fonseca)
- Morea, F. (2013). Análisis del comportamiento al ahuellamiento de diferentes mezclas en los ensayos de rueda cargada según normas BS 598-110 y CEN 12697-22. *Ciencia y Tecnología de los Materiales*(3), 7-17. Obtenido de [https://digital.cic.gba.gob.ar/bitstream/handle/11746/203/11746\\_203.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://digital.cic.gba.gob.ar/bitstream/handle/11746/203/11746_203.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Muñoz, S. L. (2018). *Evaluación Superficial del Pavimento Flexible del Tramo 3 de la Carretera Interoceánica Norte Perú - Brasil Aplicando el Método PCI*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11537/14407>
- Pérez, L. J., & Ramirez, L. J. (2018). *Evaluación y Determinación de las Patologías del Pavimento Asfáltico en la av. Los Tréboles-Distrito de Chiclayo-Provincia de Chiclayo-Departamento Lambayeque*. Obtenido de <http://repositorio.uss.edu.pe/bitstream/handle/uss/5534/P%C3%A9rez%20Le%C3%B3n%20Ramirez%20Leyva.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pérez, V. R. (2014). *Realidades y percepciones del uso de los Asfaltos Modificados en Colombia*. Obtenido de <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/12236>
- Rodriguez, V. F. (2008). *Análisis de pavimento asfáltico modificado con polímero*. Obtenido de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2008/bmfciw961a/doc/bmfciw961a.pdf>
- Romero, R. G. (2012). *Estudio del ahuellamiento en la Carretera IIRSA NORTE, Tramo 6, Sector óvalo Cáceres - Dv. Sullana*. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11042/1357>
- Salcedo, d. I. (Noviembre de 2008). *Experiencia de modificacion de cemento asfáltico con polímeros SBS en obra*. Obtenido de [https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1988/MAS\\_ICIV-L\\_004.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1988/MAS_ICIV-L_004.pdf?sequence=3&isAllowed=y)

- Salinas, R. P. (2009). *Aplicación de micropavimento usando asfalto modificado con polímero en la vía Sullá-Aguas verdes*. Obtenido de [https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1348/ICI\\_172.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1348/ICI_172.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Superintendencia de Banca, Seguros y AFP. (28 de Octubre de 2020). *Superintendencia de Banca, Seguros y AFP*. Obtenido de [https://www.sbs.gob.pe/app/pp/SISTIP\\_PORTAL/Paginas/Publicacion/TipoCambioContable.aspx](https://www.sbs.gob.pe/app/pp/SISTIP_PORTAL/Paginas/Publicacion/TipoCambioContable.aspx)
- Victoria, P. C., Ortiz, C. J., Ávalos, B. F., & Castañeda, F. A. (2015). *Modificación de asfalto con elastómero para su uso en pavimentos*. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/45665856.pdf>
- Villafana, H. G., & Ramírez, V. R. (2019). *Análisis del Comportamiento de una Mezcla Asfáltica Modificada con Polímeros SBS BETUTEC IC y una Mezcla Asfáltica Convencional 60/70*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11537/21259>

## ANEXOS

### Anexo 1: Matriz de Consistencia

Tabla N° 15: Matriz de Consistencia

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPOTESIS
GENERAL	GENERAL	GENERAL
<p><b>PG:</b> ¿De qué manera influye la adición de polímeros en el comportamiento mecánico, desempeño y rentabilidad de la mezcla asfáltica en zonas cálidas para promover su uso en Perú?</p>	<p><b>OG:</b> Determinar la influencia de la adición de polímeros en el comportamiento mecánico, desempeño y rentabilidad de la mezcla asfáltica en zonas cálidas para promover su uso en Perú.</p>	<p><b>HG:</b> La adición de polímero entre 1% - 5% mejora el comportamiento mecánico, el desempeño y rentabilidad de la mezcla asfáltica en zonas cálidas.</p>
ESPECÍFICOS	ESPECÍFICOS	ESPECÍFICOS
<p><b>PE1:</b> ¿Cuáles son las fallas de las mezclas asfálticas y como se relacionan con las propiedades?</p>	<p><b>OE1:</b> Identificar las fallas de la mezcla asfáltica y su relación con las propiedades para proponer la adición de polímeros.</p>	<p><b>HE1:</b> Las fallas de la mezcla asfáltica convencional que predominan en zonas cálidas de Perú son ahuellamiento y fisura.</p>
<p><b>PE2:</b> ¿Cuál es el tipo y porcentaje de polímero que incide en la mejora del comportamiento mecánico y desempeño para la modificación de la mezcla asfáltica?</p>	<p><b>OE2:</b> Determinar el tipo y porcentaje de polímero que incide en la mejora del comportamiento mecánico y desempeño para la modificación de la mezcla asfáltica.</p>	<p><b>HE2:</b> El polímero que incide en la mejora del comportamiento mecánico y desempeño de la mezcla asfáltica modificada es el SBS, con una adición entre 1% a 5%.</p>
<p><b>PE3:</b> ¿Cuál es la rentabilidad de la mezcla asfáltica modificada con polímeros?</p>	<p><b>OE3:</b> Determinar si es que es rentable la mezcla asfáltica modificada con polímero a través del Costo-Beneficio.</p>	<p><b>HE3:</b> El análisis de Costo-Beneficio de la mezcla asfáltica modificada con polímero SBS indica que es rentable a largo plazo.</p>

Fuente: Propia

## Anexo 2: Matriz de Operacionalización de Variables

Tabla N° 16: Matriz de Operacionalización

<b>VARIABLES INDEPENDIENTE</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>INDICES</b>	<b>INSTRUMENTO</b>
Polímeros	Cantidad y Tipo de polímero	% Polímero SBS, SBR, EVA	Investigaciones nacionales e internacionales
<b>VARIABLE DEPENDIENTE</b>			
Fallas en mezclas asfálticas	Propiedades afectadas: Estabilidad y resistencia a la fatiga	Ahuellamiento y Fisuras	Investigaciones nacionales e internacionales
	Ensayo Marshall	Estabilidad y Fluencia	Investigaciones nacionales e internacionales
Comportamiento Mecánico y Desempeño	-Ensayo de Hamburg Wheel Tracking -Ensayo de desgaste -Ensayo de tracción indirecta -Ensayo de módulo de resiliencia -Ensayo de vida fatiga	-Profundidad de ahuellamiento -Modulo Resiliencia -Porcentaje de desgaste superficial -Resistencia a la Tracción Indirecta -Resistencia a la Fatiga	Investigaciones nacionales e internacionales
Rentabilidad	Precio Unitario	Costo-Beneficio	Investigaciones nacionales e internacionales

Fuente: Propia

### Anexo 3: Glosario

Asphalt Institute (1982) menciona conceptos brindados a continuación que se han obtenido del Principio de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente.

- **AGREGADO:** Un material granular duro de composición mineralógica como la arena, la grava, la escoria, o la roca triturada, usado para ser mezclado en diferentes tamaños.
- **AHUELLAMIENTO:** Surcos que pueden desarrollarse sobre un pavimento en los carriles de las ruedas. Los ahuellamientos pueden ser resultados de una consolidación o movimiento lateral de una o más capas del pavimento bajo efectos del tráfico, o pueden ser generados por un desplazamiento de la superficie misma del pavimento. Pueden ocurrir bajo efectos del tráfico en pavimentos asfálticos nuevos que han tenido muy poca compactación durante su construcción, o como resultado del movimiento plástico de una mezcla que tiene muy poca estabilidad para resistir tráfico.
- **ASFALTO:** Es un material aglutinante de consistencia variable, de color oscuro, puede encontrar naturalmente y/o refinación de petróleos. Está constituido por mezcla compleja de hidrocarburos no volátiles de elevado peso molecular.
- **CEMENTO ASFÁLTICO:** Un asfalto con flujo o sin flujo, especialmente preparado en cuanto a calidad y consistencia para ser usado directamente en la producción de pavimentos asfálticos.
- **COMPACTACIÓN:** El acto de comprimir un volumen dado de material en un volumen más pequeño. Muy poca compactación en las capas asfálticas de pavimento puede generar una canalización de la superficie. Generalmente, la compactación se logra usando los rodillos o cilindradoras.
- **CONCRETO ASFÁLTICO:** Una mezcla en caliente, muy bien controlada, de cemento asfáltico (de alta calidad), compactada muy bien para formar una masa densa y uniforme.
- **CONSISTENCIA:** Describe el grado de fluidez o plasticidad de un cemento asfáltico a determinada temperatura. La consistencia del cemento asfáltico varía con la temperatura; por lo tanto, es necesario usar una temperatura

patrón cuando está comparando la consistencia de un cemento asfáltico con la de otro. La temperatura patrón es de 60°C (140°F).

- **DEFORMACIÓN:** La deformación de un pavimento es cualquier cambio que presente el pavimento con respecto a su forma original.
- **DENSIDAD:** El grado de solidez que puede alcanzarse en una mezcla dada y que solo está limitado por la eliminación total de los vacíos que se encuentran entre las partículas de la masa.
- **DESINTEGRACIÓN:** La separación progresiva de partículas de agregado en el pavimento, desde la superficie hacia abajo o desde los bordes hacia el interior. La desintegración puede ser causada por falta de compactación, construcción de una capa muy delgada en periodos fríos, agregado sucio o desintegrable, muy poco asfalto en la mezcla, o sobrecalentamiento de la mezcla asfáltica.
- **DUCTILIDAD:** La habilidad de una sustancia de ser estirada o estrechada en forma delgada. Aun cuando la ductilidad se considera como una característica importante del cemento asfáltico en muchas de sus aplicaciones, la presencia o ausencia de ductilidad es generalmente considerada más importante que el mismo grado de ductilidad.
- **DURABILIDAD:** La propiedad de una mezcla asfáltica de pavimentación que describe su habilidad para resistir desintegración por efectos ambientales o de tráfico. Los efectos ambientales incluyen cambios en las características del asfalto, tales como oxidación y volatilización, y cambios en el pavimento y en el agregado debido a la acción del agua, incluyendo congelamiento y deshielo.
- **ESTABILIDAD:** La habilidad de una mezcla asfáltica de pavimentación de resistir deformación bajo las cargas impuestas. La estabilidad es una función de la cohesión y la fricción interna del material.
- **ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO:** Una estructura de pavimento con todas sus capas compuestas de mezclas de asfalto y agregado, o con una combinación de capas de asfalto y capas de agregado sin tratar, colocadas sobre una subrasante tratada o sin tratar.
- **EXUDACIÓN:** Es el flujo de asfalto hacia arriba en un pavimento asfáltico, resultando en una película de asfalto sobre la superficie. La causa más común es la presencia de mucho asfalto en una o más capas de pavimento,

como resultado de una mezcla de planta muy rica en asfalto, una capa sellante mal construida, una capa de imprimación o de liga muy pesada, o un solvente que está arrastrando el asfalto hacia la superficie. Este fenómeno ocurre principalmente durante periodos ambientales muy calientes.

- **FLEXIBILIDAD:** La habilidad de un pavimento asfáltico para ajustarse a asentamientos en la fundación. Generalmente, un alto contenido de asfalto mejora la flexibilidad de una mezcla.
- **GRIETAS:** Roturas en la superficie de un pavimento asfáltico. Los tipos más comunes son:
- **PENETRACIÓN:** La consistencia de un material bituminoso expresada como la distancia, en décimas de milímetros (0.1 mm), que una aguja patrón penetra verticalmente en una muestra de material, bajo condiciones específicas de carga, tiempo y temperatura.
- **GRADOS DE PENETRACIÓN:** En los cementos asfálticos es un sistema de clasificación basado en la penetración a una temperatura de 25°C. Existen cinco grados patrones de clasificación: 40-50, 60-70, 85-100, 120-150, y 200-300.
- **POLÍMERO:** Es un compuesto químico en el que las moléculas están formadas por cadenas largas en las que se repite una unidad básica (a esta unidad básica se llama monómero). Cada polímero tiene unas propiedades determinadas. Conociendo las propiedades requeridas de un material para un uso en particular.
- **REOLOGÍA:** Ciencia que estudia la deformación y fluencia de la materia bajo una fuerza externa.
- **RESISTENCIA A LA FATIGA:** La habilidad de un pavimento asfáltico para resistir flexión repetida causada, por el paso de las cargas de las ruedas. Generalmente, entre más alto el contenido de asfalto, mayor será la resistencia a la fatiga.
- **RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO:** Es la habilidad de una superficie asfáltica de pavimento, particularmente cuando está mojado, para resistir el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos. Los factores que conducen a una alta resistencia al deslizamiento son generalmente los mismos que conducen a una alta estabilidad. Entre los factores que más contribuyen está un apropiado contenido de asfalto en la mezcla y una

textura superficial rugosa del agregado. El agregado, en particular, también debe ser capaz de resistir el pulimento. Los agregados que contienen minerales que no pueden ser pulidos, y con diferentes características de desgaste y abrasión, proporcionan una continua regeneración de la textura del pavimento y, por lo tanto, mantienen una superficie resistente al deslizamiento.

- **SUSCEPTIBILIDAD TÉRMICA DEL ASFALTO:** Se define como el cambio de la consistencia, medida generalmente por la viscosidad, con un cambio de la temperatura. en caso del asfalto viene a ser la variación de sus propiedades al ser sometido a determinadas temperaturas.
- **TRABAJABILIDAD:** La facilidad con que las mezclas de pavimentación pueden colocadas y compactadas.
- **VISCOSIDAD:** Es una medida de la resistencia al flujo. Es un método usado para medir la consistencia del asfalto. (pp. 252-258)

## Anexo 4: Tipo de Cambio Contable

Tabla N° 17: Tipo de Cambio Contable

### TIPO DE CAMBIO CONTABLE

Ingreso fecha: 28/10/2020 (dd/mm/aaaa) Consultar Exportar		
Tipo de Cambio al 28/10/2020		
PAIS	MONEDA	TIPO DE CAMBIO (En S/)
Estados Unidos de América	Dólar de N.A.	3.6120
Unión Europea	Euro	4.244916
Argentina	Peso Argentino	0.046129
Australia	Dólar Australiano	2.549227
Bangladesh	Taka Bangladesí	0.042831
Bolivia, Estado Plurinacional de	Boliviano	0.529906
Brasil	Real	0.630355
Bulgaria	Lev	2.170675
Canadá	Dólar Canadiense	2.713544
Chile	Peso Chileno	0.004670
China	Yuan Chino Off-Shore	0.536884
China	Yuan	0.536870
Colombia	Peso Colombiano	0.000943
Corea, República de (Sur)	Won Surcoreano	0.003197
Dinamarca	Corona Danesa	0.570129
Ecuador	Dólar de N.A.	3.612000
Emiratos Árabes Unidos	Dirham	0.983418
Federación Rusa (Rusia)	Rublo	0.045778
Filipinas	Peso de Filipinas	0.074671
Georgia	Lari Georgiano	1.122158
Guatemala	Quetzal	0.464276
Hong Kong	Dólar de Hong Kong	0.466064
India	Rupia de la India	0.048896
Indonesia	Rupia de Indonesia	0.000246
Japón	Yen Japonés	0.034628
Malasia	Dólar Malasio o Ringgit	0.869524
México	Peso Mexicano	0.170320
Nigeria	Naira Nigeriana	0.009366
Noruega	Corona Noruega	0.386260
Nueva Zelanda	Dólar Neozelandés	2.403353
Panamá	Balboa	3.612000
Paraguay	Guaraní	0.000517
Polonia	Zloty Polaco	0.917871
Reino Unido	Libra Esterlina	4.692129
República Dominicana	Peso de República Dominicana	0.062166
Suecia	Corona Sueca	0.408225
Suiza	Franco Suizo	3.970105
Tailandia	Baht	0.115548
Taiwán, Provincia de China	Nuevo Dólar de Taiwan	0.126413
Trinidad y Tobago	Dólar de Trinidad y Tobago	0.533879
Turquía	Lira	0.436871
Uruguay	Peso Uruguayo	0.084629
Vietnam	Dong	0.000155

Fuente: Superintendencia de Banca, Seguros y AFP (2020)

## Anexo 5: Ítem 1 - Data recolectada

### “Análisis del Comportamiento de una Mezcla Asfáltica Modificada con Polímeros SBS BETUTEC IC y una Mezcla Asfáltica Convencional 60/70”

En la investigación de Villafana & Ramírez (2019), se realizó la modificación de la mezcla asfáltica convencional con Polímero SBS. Las características se detallan a continuación:

- Agregados: Piedra chancada 3/4" (45%), Arena chancada 3/8" (33%) y Arena Zarandeada 3/8" (22%)
- Asfalto Convencional: Se utilizó como cemento asfáltico base un CAP PEN 60/70
- Asfalto Modificado con Polímero: Se empleó BETUTEC IC, que es un CAP PEN 60/70 modificado con SBS, abastecido por el proveedor TDM ASFALTOS.

### Cuadro Comparativo de Diseño (Ensayo Marshall)

Tabla N° 18: Cuadro Comparativo de Diseño de Mezcla (PEN 60/70 vs. BETUTEC IC)

<b>DISEÑO DE MEZCLA</b>			
	<b>PEN 60/70</b>	<b>BETUTEC IC</b>	<b>TOLERANCIA</b>
<b>NUMERO DE GOLPES</b>	75	75	75
<b>CONTENIDO DE ASFALTO (%)</b>	5.4	5.3	
<b>ESTABILIDAD (kgf)</b>	1373	1964	831 (mínimo)
<b>FLUJO (mm)</b>	3.47	3.33	2 - 4
<b>PESO ESPECIFICO BULK</b>	2.433	2.427	
<b>RICE</b>	2.529	2.525	
<b>PORCENTAJE DE VACIOS</b>	3.8	3.9	3 - 5
<b>V.M.A.</b>	14.7	14.8	14
<b>RELACION POLVO/ASFALTO</b>	1.08	1.11	0.6 - 1.3

Fuente: Villafana & Ramírez (2019)

- Gráfico Comparativo de Estabilidad (MAC – AMP)

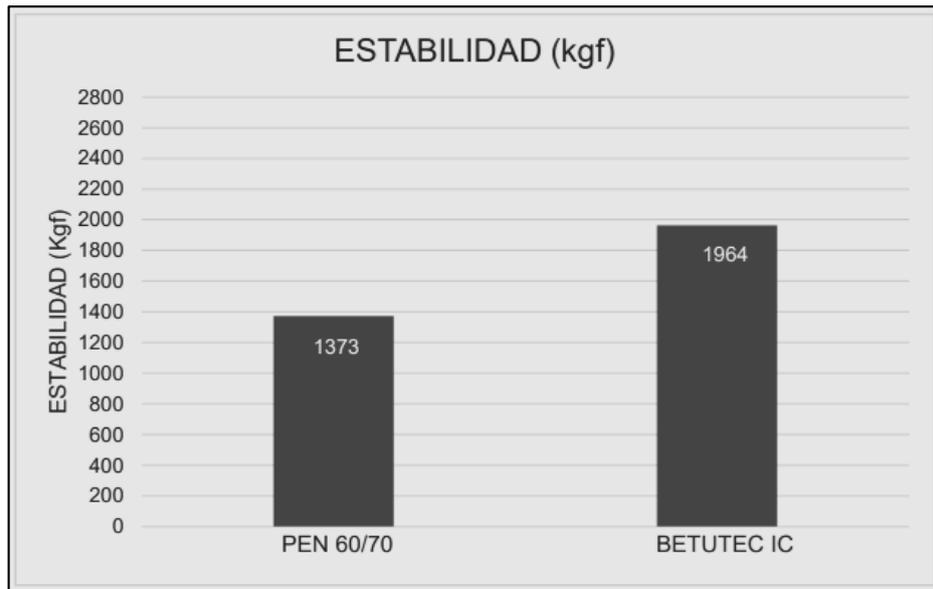


Figura N° 26: Valores de Estabilidad graficados de ambas mezclas  
Fuente: Villafana & Ramírez (2019)

- Gráfico Comparativo de Fluencia (MAC – AMP)

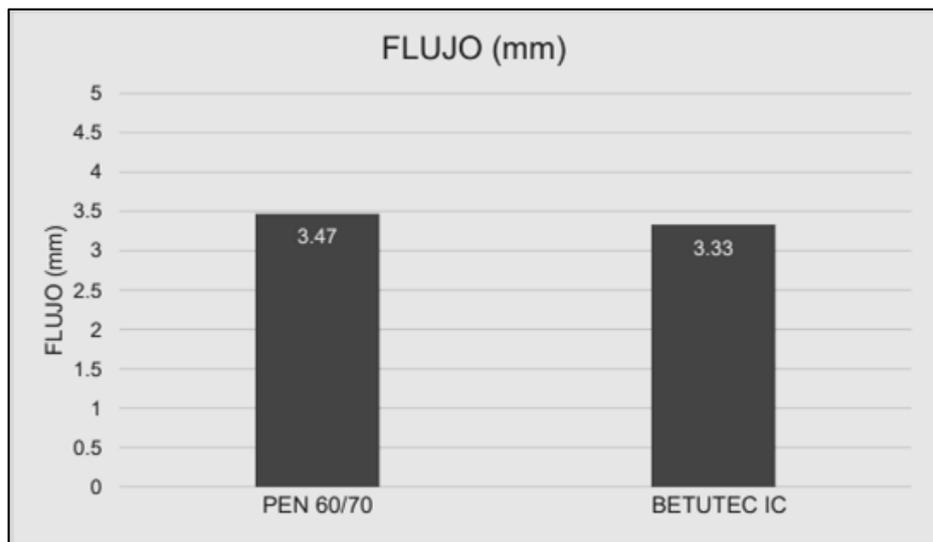


Figura N° 27: Valores de Flujo Graficados de ambas mezclas  
Fuente: Villafana & Ramírez (2019)

## Resultados del Análisis Comparativo del Ensayo Hamburg Wheel Track

Tabla 19: Resultados de los ensayos de Rueda de Hamburgo

RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE			
DATOS DE ENSAYO	PEN 60/70	BETUTEC IC	TOLERANCIA
PIEDRA CHANCADA	45.00%	45.00%	
ARENA CHANCADA	33.00%	33.00%	
ARENA ZARANDEADA	22.00%	22.00%	
OPTIMO DE ASFALTO	5.40%	5.30%	
RICE (Kg/cm <sup>3</sup> )	2.529	2.525	
% DE VACIOS	6.80%	6.70%	6.0% - 8.0%
T° DE ENSAYO	50.0°C	50.0°C	
N° MAXIMO PASADAS	20,000	20,000	
N° PASADAS RECIBIDAS	20,000	20,000	
PROFUNDIDAD FINAL (mm)	7.77	1.8	<12.5 mm
PUNTO DE INFLEXIÓN	9500 pasadas	No existe	

Fuente: Villafana & Ramírez (2019)

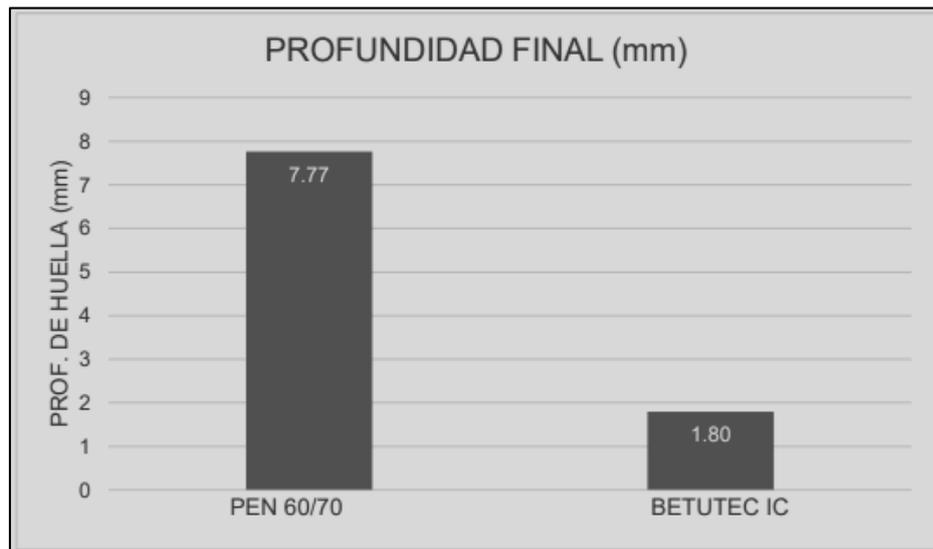


Figura N° 28: Valores de profundidad de Ahuellamiento graficados de ambas mezclas  
Fuente: Villafana & Ramírez (2019)

- Gráfico Comparativo de Diagramas de Comportamiento de ambas mezclas



Figura N° 29: Deformación vs Número de Pasadas  
Fuente: Villafana & Ramírez (2019)

#### Anexo 6: Ítem 2 - Data recolectada

“Estudio Comparativo del Método Convencional y Uso de los Polímeros EVA y SBS en la Aplicación de Mezclas Asfálticas”

En la investigación de Infante & Vásquez (2016), se realizó el análisis comparativo de la mezcla asfáltica convencional y modificada con Polímeros EVA y SBS, en su comportamiento mecánico. Las características se detallan a continuación:

- Agregados: Grava (51.70%), Arena (48.30%) y Filler (1.76%)
- Asfalto Convencional: Se utilizó como cemento asfáltico base CAP PEN 60/70 con un 5.3% de porcentaje óptimo.
- Asfalto Modificado con Polímero: Se emplearon los polímeros EVA(3%) y SBS(4%).

## Mezcla Asfáltica Convencional

- Resultados de Ensayo de Estabilidad – Flujo (Método Marshall)

Tabla N° 20: Resultados de Ensayo Marshall (convencional)

RESULTADOS DE ESTABILIDAD MARSHALL										
BRIQUETAS	% DE Asfalto	VOLUMEN(cm3)	LECTURA FLUJO	FLUJO(mm)	Lectura de Estabilidad	ALTURA ESPECIMEN mm	FATOR DE CORRECCIÓ N	Estabilidad en Kg	Estabilidad Corregida en Kg	VERIFICACION
7.1	5.3 %	482.62	12	3.00	340	60.0	1.103	1172.50	1293	OK
7.2	5.3 %	501.54	10	2.50	335	62.6	1.024	1155.36	1183	OK
7.3	5.3 %	486.95	9	2.30	330	62.0	1.040	1138.00	1184	OK
PROMEDIO				2.60					1220	OK

Fuente: Infante & Vásquez (2016)

## Mezcla Asfáltica Modificada con polímero EVA

- Resultados de Ensayo de Estabilidad – Flujo (Método Marshall)

Tabla N° 21: Resultados de Ensayo Marshall (EVA)

RESULTADOS DE ESTABILIDAD MARSHALL										
BRIQUETAS	% DE EVA	VOLUMEN(cm3)	FLUJO	FLUJO(mm)	Lectura de Estabilidad	ALTURA ESPECIMEN (mm)	CORRECCIÓN	Estabilidad en Kg	Estabilidad Corregida en Kg	
1	2.0 %	480.53	6.67	1.67	523.33	59.86	1.11	1801.12	1993	
2	3.0 %	488.94	8.33	2.10	387.67	60.97	1.07	1335.94	1432	
3	4.0 %	497.06	8.33	2.10	321.67	61.96	1.05	1166.79	1223	
4	5.0 %	483.56	9.00	2.30	414.00	60.96	1.07	1414.77	1516	
5	6.0 %	489.63	9.33	2.37	614.67	61.33	1.06	2114.10	2241	
					452.27	61.013	1.072	1567	1681	

Fuente: Infante & Vásquez (2016)

## Mezcla Asfáltica Modificada con polímero SBS

- Resultados de Ensayo de Estabilidad – Flujo (Marshall)

Tabla N° 22: Resultados de Ensayo Marshall (SBS)

RESULTADOS DE ESTABILIDAD MARSHALL										
BRIQUETAS	% DE SBS	VOLUMEN(cm3)	FLUJO	FLUJO(mm)	Lectura de Estabilidad	ALTURA ESPECIMEN (mm)	CORRECCIÓN	Estabilidad en Kg	Estabilidad Corregida en Kg	
1	2.0 %	508.54	6.67	1.70	492.33	63.40	1.03	1694.60	1743	
2	3.0 %	504.78	7.00	1.77	608.33	62.98	1.01	2092.56	2120	
3	4.0 %	507.73	10.67	2.70	546.00	63.74	0.99	1877.60	1869	
4	5.0 %	518.05	10.00	2.53	686.67	63.14	1.01	2361.16	2382	
5	6.0 %	519.53	9.33	2.37	701.33	63.59	1.00	2411.45	2407	
					606.93	63.372	1.008	2087	2104	

Fuente: Infante & Vásquez (2016)

## Anexo 7: Ítem 3 - Data recolectada

"Análisis Comparativo del Comportamiento Mecánico de una Mezcla Asfáltica Modificada con Betutec IC + Aditivo Warmix respecto a la Mezcla Asfáltica Convencional"

- Cuadro comparativo de Mezcla Asfáltica Convencional vs Mezcla Asfáltica Modificada con polímero SBS

Tabla N° 23: Cuadro comparativo de Mezcla Asfáltica Convencional vs Mezcla Asfáltica Modificada con polímero SBS

Parámetros de Diseño	Clase de mezcla PEN 60/70	Convencional	Modificado	Diferencia
<b>Marshall MTC E 504</b>				
Compactación, número de golpes por lado	75	75	75	75
Cemento Asfáltico	%	5.5	5.5	5.5
Densidad	kg/cm <sup>3</sup>	2.391	2.428	1.55%
Estabilidad	kg/cm <sup>2</sup>	1360	1770	30.15%
Flujo	0.01"	13.3	13.7	3.01%
Vacios	%	4.1	3.1	-24.39%
Vacios Agregado Mineral	%	15.1	15.5	2.65%

Fuente: Cahuana & Limas (2018)

## Análisis Comparativo Económico de las Mezclas Asfálticas

En la investigación Cahuana & Limas (2018) se realizó un análisis comparativo Costo – Beneficio de la mezcla asfáltica convencional y mezcla asfáltica modificada, realizándose la simulación de un tramo de 1km de espesor igual a 3” y un ancho de calzada de 3.60 m.

Además nos indica que la mezcla asfáltica modificada tiene una vida útil de nuevo a diez años en óptimas condiciones y la mezcla asfáltica convencional de tres a cuatro años en óptimas condiciones. A partir de

un tercer año, para la mezcla asfáltica convencional, se realiza un mantenimiento para que la capa de rodadura esté en buen estado e incrementar su vida útil, ya que se realizó el análisis comparativo en el mismo tiempo (10 años). En la siguiente Tabla 46 se presenta el Análisis Comparativo Económico de las Mezclas Asfálticas. (Cahuana & Limas, 2018, pp. 79-80)

Tabla N° 24: Análisis Comparativo Económico

	<b>Asfalto Convencional</b>	<b>Asfalto Modificado con Betutec IC + Aditivo Warmix</b>
Unidad	m3	m3
Metrado	274.32	274.32
Precio Unitario	340	450
Precio Unitario de Mantenimiento	10720	10720
N° Veces de Mantenimiento	3	0
<b>Total</b>	<b>S/ 125,428.80</b>	<b>S/ 123,444.00</b>

Fuente: Cahuana & Limas (2018)

Anexo 8: Ítem 4 - Data recolectada

“Evaluación de estabilidad de la mezcla asfáltica en caliente utilizando aditivo SBS, Trujillo – La Libertad”

- Resultados de Estabilidad de Ambas Mezclas Asfálticas

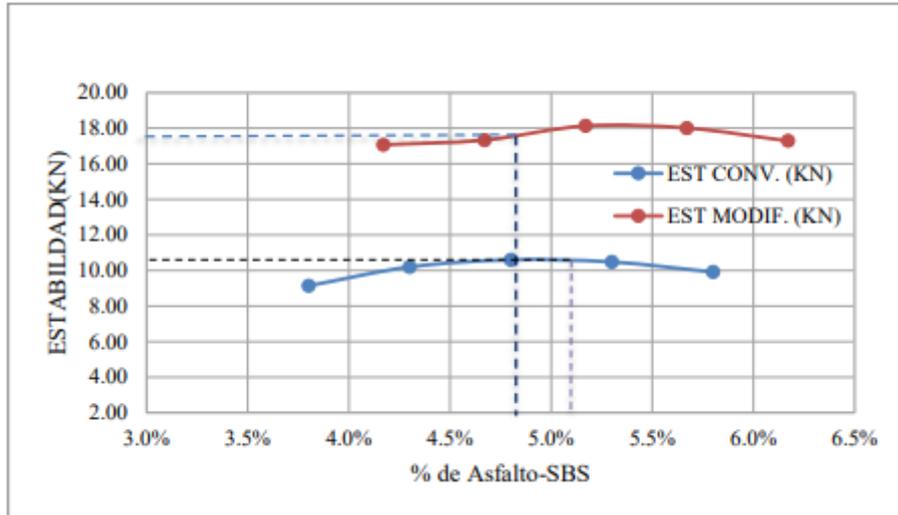


Figura N° 30: Comparación de Estabilidad en la mezcla convencional y modificada con SBS. Fuente: Flores & Monzón (2020)

- Resultados de Fluencia de Ambas Mezclas Asfálticas

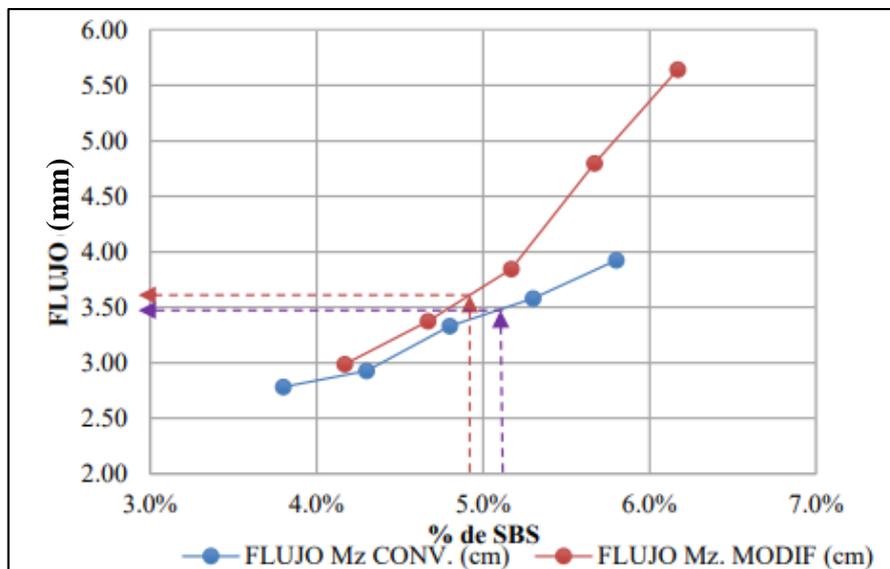


Figura N° 31: Comparación de Flujo en la mezcla convencional y modificada con SBS. Fuente: Flores & Monzón (2020)

## Anexo 9: Ítem 5 – Data recolectada

### “Caracterización de Mezclas Asfálticas en Caliente, elaboradas con el Uso de Cemento Asfáltico Modificado con Polímero SBR y SBS”

En la investigación de Borja & Cárdenas (2019), se realizó el análisis comparativo del comportamiento de mezclas asfálticas en caliente elaboradas con cemento asfáltico modificado con polímeros SBS (2%) y SBR (1%) y una mezcla asfáltica convencional, mediante la evaluación del parámetro de deformación plástica, con la aplicación de ensayos normalizados, como estabilidad y flujo Marshall, pérdida por desgaste al cántabro y tracción indirecta. Las características se detallan a continuación:

- Agregados: Grueso (2%), Intermedio (50%) y Fino (48%)
- Asfalto Convencional: Se utilizó como cemento asfáltico convencional AC – 20 (Equivale a un CAP PEN 60/70) con un 6.10% de porcentaje óptimo.

Tabla N° 25: Ensayo de penetración AC - 20 con SBS

<i>PENETRACIONES (m m /10)</i>	
<i>MUESTRA: Asfalto Convencional AC - 20</i>	
<i>Penetración # 1</i>	<b>68</b>
<i>Penetración # 2</i>	<b>67</b>
<i>Penetración # 3</i>	<b>66</b>
<i>Penetración Promedio</i>	<b>67</b>

Fuente: Borja & Cárdenas (2019)

- Asfalto Modificado con Polímero: Se emplearon los polímeros SBS (2%) y SBR (1%).

Cuadro Comparativo de Estabilidad y Flujo Marshall (MAC – MAMP (SBS Y SBR))

Tabla N° 26: Estabilidad y flujo Marshall mezcla convencional y modificadas

<b>ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE</b>						
<b>MEZCLA</b>	<b>BRIQUETA #</b>	<b>ESTABILIDAD (Lb)</b>				<b>FLUJO (1/100'')</b>
		<b>Lectura</b>	<b>Medida Corregida por anillo (Lb)</b>	<b>Factor de corrección por Volumen</b>	<b>Medida Corregida (Lb)</b>	
			<b>a</b>		<b>b</b>	
				<b>a*10.22</b>	<b>b*c</b>	<b>e</b>
AC -20 a 6.10%	1	225	2300	0.86	1978	9
	2	231	2361	0.89	2101	9
	3	226	2310	0.89	2056	8
	<b>Promedio</b>				<b>2045</b>	<b>9</b>
SBS 2%	1	225	2300	0.96	2208	7
	2	274	2800	0.93	2604	12
	3	272	2780	0.93	2585	10
	<b>Promedio</b>				<b>2466</b>	<b>10</b>
SBR 1%	1	280	2862	0.83	2375	11
	2	274	2800	0.81	2268	14
	3	293	2994	0.81	2426	11
	<b>Promedio</b>				<b>2356</b>	<b>12</b>

Fuente: Borja & Cárdenas (2019)

- Gráfico Comparativo de Estabilidad y Flujo (MAC – AMP SBS)

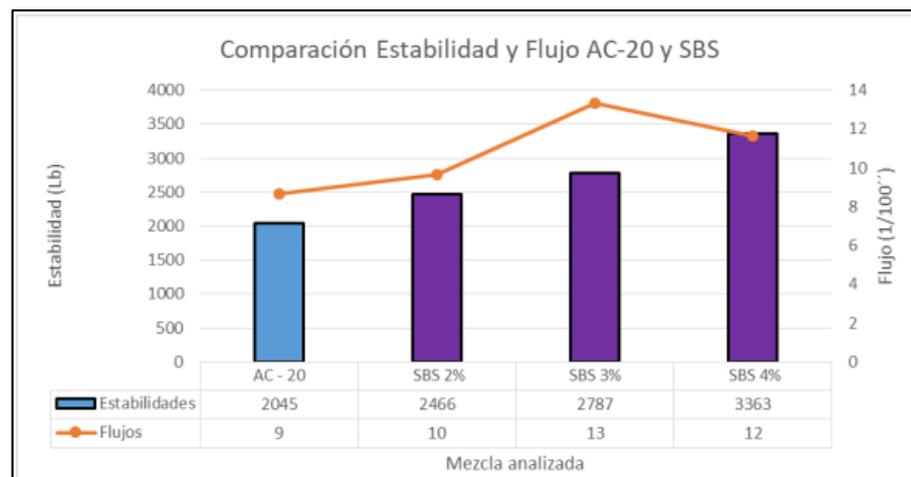


Figura N° 32: Comparación estabilidad y flujo mezcla convencional AC – 20 a 6.10% y mezclas modificadas con SBS.

Fuente: Borja & Cárdenas (2019)

- Gráfico Comparativo de Estabilidad y Flujo (MAC – AMP SBR)

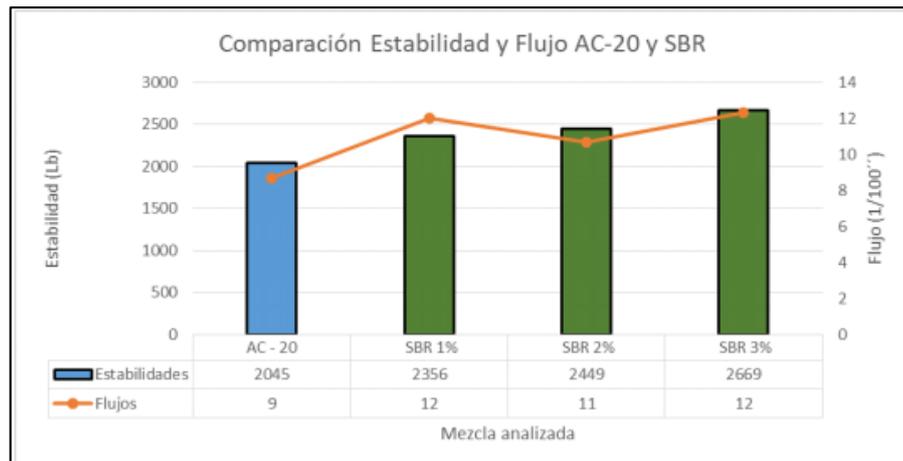


Figura N° 33: Comparación estabilidad y flujo mezcla convencional AC – 20 a 6.10% y mezclas modificadas con SBR.

Fuente: Borja & Cárdenas (2019)

▪ Análisis de Costos Unitarios (Convencional)

Tabla N° 27: Carpeta asfáltica con asfalto convencional de 7.5 cm de espesor

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS						
					FECHA:	21/12/2018
RUBRO:	CARPETA ASFALTICA CONVENCIONAL 7.5 CM DE ESPESOR				UNIDAD:	m <sup>2</sup>
<b>EQUIPOS</b>						
DESCRIPCION	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO	
	A	B	C = A x B	R	D = C x R	
Cargadora frontal	1.00	38.00	38.00	0.0034	0.13	
Rodillo compactador	1.00	10.20	10.20	0.0034	0.03	
Rodillo vibratorio doble tambor	1.00	22.00	22.00	0.0034	0.07	
Planta de asfalto	1.00	90.00	90.00	0.0034	0.31	
Distribuidor de asfalto	1.00	72.00	72.00	0.0034	0.24	
Terminadora de asfalto	1.00	55.00	55.00	0.0034	0.19	
Volqueta	1.00	25.00	25.00	0.0034	0.09	
HERRAMIENTA MENOR	1.00	0.05			0.01	
<b>SUBTOTAL M</b>					1.07	
<b>MANO DE OBRA</b>						
DESCRIPCION	CANTIDAD	JORNAL /HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO	
	A	B	C = A x B	R	D = C x R	
Operadores de Equipo pesado(E.O.-C1)	7.00	3.93	27.51	0.0034	0.09	
Peón(E.O.-E2)	6.00	3.51	21.06	0.0034	0.07	
Maestro de Obra(E.O. C1)	1.00	3.93	3.93	0.0034	0.01	
					0.18	
<b>MATERIALES</b>						
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	COSTO		
		A	B	C = A x B		
fino cribado	m <sup>3</sup>	0.10	15.00	1.50		
Material granular	m <sup>3</sup>	0.10	15.00	1.50		
Diesel	gal	2.94	1.05	3.09		
Asfalto AC-20	gal	2.89	1.45	4.19		
<b>SUBTOTAL O</b>					10.28	
<b>TRANSPORTE</b>						
DESCRIPCION	UNIDAD	DISTANCIA	CANTIDAD	TARIFA	COSTO	
			A	B	C = A x B	
<b>SUBTOTAL P</b>					0.00	
				TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)	0	11.52
				COSTO INDIRECTO %		15.00
				COSTO INDIRECTO \$		1.73
				COSTO TOTAL DEL RUBRO:		13.25
				VALOR OFERTADO:		13.25
				SON:	TRECE DOLARES CON VEINTE Y CINCO CENTAVOS	

Fuente: Borja & Cárdenas (2019)

▪ Análisis de Costos Unitarios (MAMP SBS)

Tabla N° 28: Carpeta asfáltica con asfalto modificado con SBS de 7.5 cm de espesor

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS						
					FECHA:	21/12/2018
RUBRO:	CARPETA ASFÁLTICA MODIFICADA CON SBS AL 2% DE 7.5 CM DE ESPESOR				UNIDAD:	m <sup>2</sup>
DETALLE:						
<b>EQUIPOS</b>						
DESCRIPCION	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO	
	A	B	C = A x B	R	D = C x R	
Cargadora frontal	1.00	38.00	38.00	0.0034	0.13	
Rodillo compactador	1.00	10.20	10.20	0.0034	0.03	
Rodillo vibratorio doble tambor	1.00	22.00	22.00	0.0034	0.07	
Planta de asfalto	1.00	90.00	90.00	0.0034	0.31	
Distribuidor de asfalto	1.00	72.00	72.00	0.0034	0.24	
Terminadora de asfalto	1.00	55.00	55.00	0.0034	0.19	
Volqueta	1.00	25.00	25.00	0.0034	0.09	
HERRAMIENTA MENOR	1.00	0.05			0.01	
SUBTOTAL M					1.07	
<b>MANO DE OBRA</b>						
DESCRIPCION	CANTIDAD	JORNAL /HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO	
	A	B	C = A x B	R	D = C x R	
Operadores de Equipo pesado(E.O.-C1)	7.00	3.93	27.51	0.0034	0.09	
Peón(E.O.-E2)	6.00	3.51	21.06	0.0034	0.07	
Maestro de Obra(E.O. C1)	1.00	3.93	3.93	0.0034	0.01	
					0.18	
<b>MATERIALES</b>						
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	COSTO		
		A	B	C = A x B		
fino cribado	m <sup>3</sup>	0.10	15.00	1.50		
Material granular	m <sup>3</sup>	0.10	15.00	1.50		
Diesel	gal	2.94	1.05	3.09		
Asfalto AC-20 con SBS al 2%	gal	2.89	2.46	7.11		
SUBTOTAL O					13.19	
<b>TRANSPORTE</b>						
DESCRIPCION	UNIDAD	DISTANCIA	CANTIDAD	TARIFA	COSTO	
			A	B	C = A x B	
SUBTOTAL P					0.00	
ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN EL IVA			TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)		0	14.44
			COSTO INDIRECTO %			15.00
			COSTO INDIRECTO \$			2.17
			COSTO TOTAL DEL RUBRO:			16.61
			VALOR OFERTADO:			16.61
SON:		DIECISEIS DOLARES CON SESENTA Y UNO CENTAVOS				

Fuente: Borja & Cárdenas (2019)

▪ Análisis de Costos Unitarios (MAMP SBR)

Tabla N° 29: Carpeta asfáltica con asfalto modificado con SBR de 7.5 cm de espesor

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS						
RUBRO: CARPETA ASFÁLTICA MODIFICADA CON SBR AL 1% DE 7.5 CM DE ESPESOR					FECHA: 21/12/2018	
DETALLE:					UNIDAD: m <sup>2</sup>	
EQUIPOS						
DESCRIPCION	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO	
	A	B	C = A x B	R	D = C x R	
Cargadora frontal	1.00	38.00	38.00	0.0034	0.13	
Rodillo compactador	1.00	10.20	10.20	0.0034	0.03	
Rodillo vibratorio doble tambor	1.00	22.00	22.00	0.0034	0.07	
Planta de asfalto	1.00	90.00	90.00	0.0034	0.31	
Distribuidor de asfalto	1.00	72.00	72.00	0.0034	0.24	
Terminadora de asfalto	1.00	55.00	55.00	0.0034	0.19	
Volqueta	1.00	25.00	25.00	0.0034	0.09	
HERRAMIENTA MENOR	1.00	0.05			0.01	
SUBTOTAL M					1.07	
MANO DE OBRA						
DESCRIPCION	CANTIDAD	JORNAL /HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO	
	A	B	C = A x B	R	D = C x R	
Operadores de Equipo pesado(E.O.-C1)	7.00	3.93	27.51	0.0034	0.09	
Peón(E.O.-E2)	6.00	3.51	21.06	0.0034	0.07	
Maestro de Obra(E.O. C1)	1.00	3.93	3.93	0.0034	0.01	
SUBTOTAL N					0.18	
MATERIALES						
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	COSTO		
		A	B	C = A x B		
fino cribado	m <sup>3</sup>	0.10	15.00	1.50		
Material granular	m <sup>3</sup>	0.10	15.00	1.50		
Diesel	gal	2.94	1.05	3.09		
Asfalto AC-20 con SBR al 1%	gal	2.89	2.08	6.01		
SUBTOTAL O					12.10	
TRANSPORTE						
DESCRIPCION	UNIDAD	DISTANCIA	CANTIDAD	TARIFA	COSTO	
			A	B	C = A x B	
SUBTOTAL P					0.00	
ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN EL IVA			TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)		0	13.34
			COSTO INDIRECTO %			15.00
			COSTO INDIRECTO \$			2.00
			COSTO TOTAL DEL RUBRO:			15.35
			VALOR OFERTADO:			15.35
SON: QUINCE DOLARES CON TREINTA Y CINCO CENTAVOS						

Fuente: Borja & Cárdenas (2019)

- Ensayo de Desgaste

Tabla N° 30: Resultados del ensayo para mezcla asfáltica convencional y modificadas con polímeros SBS y SBR

Muestra: Briquetas con asfalto AC- 20 con y sin Polimeros SBS y SBR				
Tipo mezcla	# briqueta	Peso (g)		%Desgaste = $\frac{(P1-P2)}{P1} \times 100$
		P1	P2	
Asfalto Convencional	1	1199	1168	2.6%
	2	1198	1166	2.7%
	3	1200	1170	2.5%
	4	1198	1165	2.8%
<b>Promedio</b>				<b>2.6%</b>
Asfalto con SBS al 2%	1	1270	1242	2.2%
	2	1217	1194	1.9%
	3	1250	1222	2.2%
	4	1245	1220	2.0%
<b>Promedio</b>				<b>2.1%</b>
Asfalto con SBR al 1%	1	1137	1119	1.6%
	2	1192	1168	2.0%
	3	1155	1135	1.7%
	4	1168	1145	2.0%
<b>Promedio</b>				<b>1.8%</b>

Fuente: Borja & Cárdenas (2019)

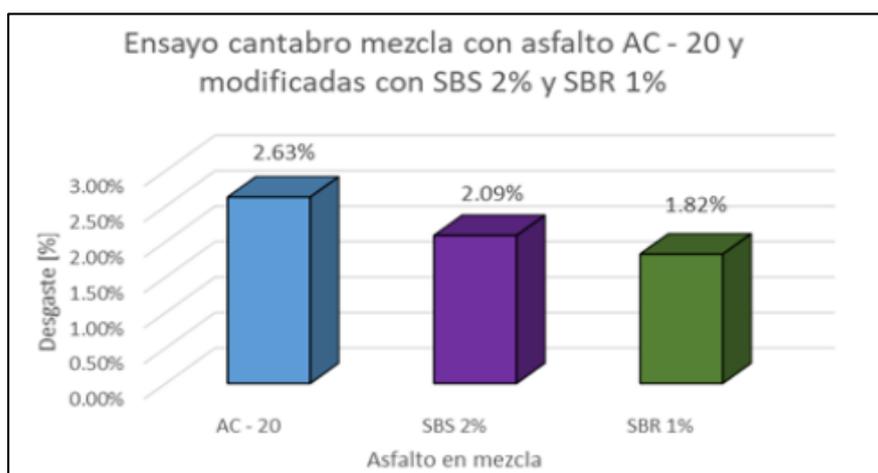


Figura N° 34: Ensayo de desgaste mezcla con asfalto AC - 20 y modificadas con SBS 2% y SBR 1%

Fuente: Borja & Cárdenas (2019)

- Ensayo de Tracción Indirecta

Tabla N° 31: Resultados de ensayo de tracción indirecta en mezclas asfálticas

<b>ENSAYO TRACCIÓN INDIRECTA</b>					
<b>MUESTRA: Briquetas con asfalto AC - 20 con y sin Polimeros SBS y SBR</b>					
TIPO MEZCLA	# BRIQUETA	DIMENSIONES		CARGA (P) [Kg]	Tracción Indirecta $R_t = (2 \cdot P) / (\pi \cdot H \cdot D)$ [Kg/cm <sup>2</sup> ]
		Espesor (H) [cm]	Diametro (D) [cm]		
Asfalto Convencional AC - 20	1	6.7	10.1	280	2.63
	2	6.8	10.15	295	2.72
	3	6.6	10.15	285	2.71
	<b>PROMEDIO</b>				
Asfalto con SBS al 2%	1	6.75	10.2	840	7.77
	2	6.8	10.15	835	7.70
	3	6.7	10.2	833	7.76
	<b>PROMEDIO</b>				
Asfalto con SBR al 1%	1	6.8	10.15	390	3.60
	2	6.75	10.2	405	3.74
	3	6.8	10.12	411	3.80
	<b>PROMEDIO</b>				

Fuente: Borja & Cárdenas (2019)

En la investigación de Borja & Cárdenas (2019) indica que los valores obtenidos del ensayo para cada una de las mezclas asfálticas analizadas, además se aprecia que todas las mezclas cumplen con lo especificado en la normativa en la cual se aclara, que el valor mínimo de tracción indirecta para una mezcla asfáltica será de 2.5 Kg/cm<sup>2</sup>, se observa claramente que la resistencia se incrementa con la adición de los polímeros SBS y SBR. (p. 172)



Figura N° 35: Ensayo de tracción indirecta

Fuente: Borja & Cárdenas (2019)

Anexo 10: Ítem 6 – Data recolectada

“Evaluación de mezclas producidas con Ligantes Asfálticos peruanos convencional PEN 60/70 y modificado por polímeros SBS tipo I 60/60 y PG 76-22”

- Composición granulométrica de mezclas con 20% de piedra, 20% de granizo y 60% de polvo de piedra. Porcentaje óptimo de asfalto (CAP PEN 60/70): 5.5%

Resultados de Estabilidad y Fluencia

Tabla N° 32: Resultados de Estabilidad y fluencia sin envejecimiento - CAP PEN 60/70

T. de Asfalto (%)	Dens. Ap (d)	DTM	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)	Estabilidad (N)	Fluência (mm)	CSM (N/mm)
4,5	2,480	2,667	7,0	17,98	60,91	16645	3,56	4681
5,0	2,529	2,645	4,4	16,80	73,86	16072	3,68	4364
5,5	2,557	2,623	2,5	16,32	84,55	16015	3,94	4068
6,0	2,565	2,601	1,4	16,51	91,47	15299	4,06	3764
6,5	2,552	2,580	1,1	17,36	93,81	14464	4,19	3451

Fuente: Escalante (2007)

Tabla N° 33: Resultados de Estabilidad y fluencia con envejecimiento - CAP PEN 60/70

T. de Asfalto (%)	Dens. Ap (d)	Gmm	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)	Estabilidad (N)	Fluência (mm)	CSM (N/mm)
4,5	2,415	2,665	9,4	20,05	53,18	18343	3,81	4815
5,0	2,472	2,643	6,5	18,59	65,26	17935	3,81	4707
5,5	2,499	2,621	4,7	18,14	74,36	17622	3,81	4625
6,0	2,507	2,600	3,6	18,32	80,58	16820	4,06	4139
6,5	2,500	2,578	3,0	18,98	84,00	15949	4,06	3925

Fuente: Escalante (2007)

Tabla N° 34: Resultados de Estabilidad y fluencia sin envejecimiento - MAMP(SBS)

<b>T. de Asfalto (%)</b>	<b>Dens. Ap (d)</b>	<b>DTM</b>	<b>Vv (%)</b>	<b>VAM (%)</b>	<b>RBV (%)</b>	<b>Estabilidad (N)</b>	<b>Fluência (mm)</b>	<b>CSM (N/mm)</b>
4,5	2,502	2,665	6,1	17,26	64,45	23367	3,05	7666
5,0	2,528	2,643	4,3	16,82	74,27	22795	3,18	7180
5,5	2,549	2,620	2,7	16,58	83,53	21713	3,43	6332
6,0	2,554	2,599	1,7	16,84	89,91	20314	3,94	5160
6,5	2,547	2,577	1,2	17,52	93,38	19251	4,19	4594

Fuente: Escalante (2007)

Tabla N° 35: Resultados de Estabilidad y fluencia con envejecimiento - MAMP(SBS)

<b>T. de Asfalto (%)</b>	<b>Dens. Ap (d)</b>	<b>Gmm</b>	<b>Vv (%)</b>	<b>VAM (%)</b>	<b>RBV (%)</b>	<b>Estabilidad (N)</b>	<b>Fluência (mm)</b>	<b>CSM (N/mm)</b>
4,5	2,455	2,663	7,8	18,74	58,26	24545	3,13	7835
5,0	2,485	2,642	6,0	18,23	67,36	23829	3,05	7818
5,5	2,499	2,618	4,5	18,11	74,99	24182	3,22	7516
6,0	2,503	2,598	3,7	18,51	80,18	21049	3,81	5525
6,5	2,497	2,576	3,0	19,09	84,03	20518	3,98	5156

Fuente: Escalante (2007)

## Análisis Comparativo de Ensayo de Módulo de Resiliencia

Para la ejecución de la prueba del módulo de resiliencia, se tomó una tasa de deformación en el rango de 0.002 a 0.003 en la realización de la prueba de resiliencia, con el objetivo de aplicar la menor carga posible para una buena lectura de los desplazamientos. Ningún valor de carga aplicado superó el 25% de la resistencia a la tracción.

### ▪ Cuadro Comparativo de Valores

Tabla N° 36: Resultados de ensayo de módulo de resiliencia.

Condición	Temperatura (°C)	Asfalto (%)	MR (MPa)	
			CAP PEN 60/70	AMP Tipo 1 60/60
Sin envejecimiento	5	5.1	15615	18655
Sin envejecimiento	25	5.1	2135	2335
Con 2h de envejecimiento	5	5.8	18293	23696
Con 2h de envejecimiento	25	5.8	4423	5106
Con 4h de envejecimiento	5	5.8	25219	22618
Con 4h de envejecimiento	25	5.8	5750	6189

Fuente: Escalante (2007)

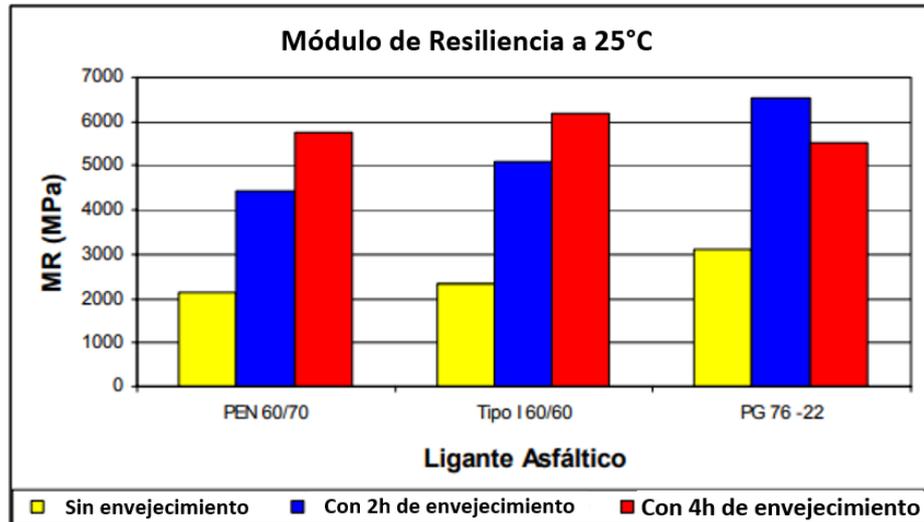


Figura N° 36: Variación de MR a 25°C en función de la condición de envejecimiento. Fuente: Escalante (2007)

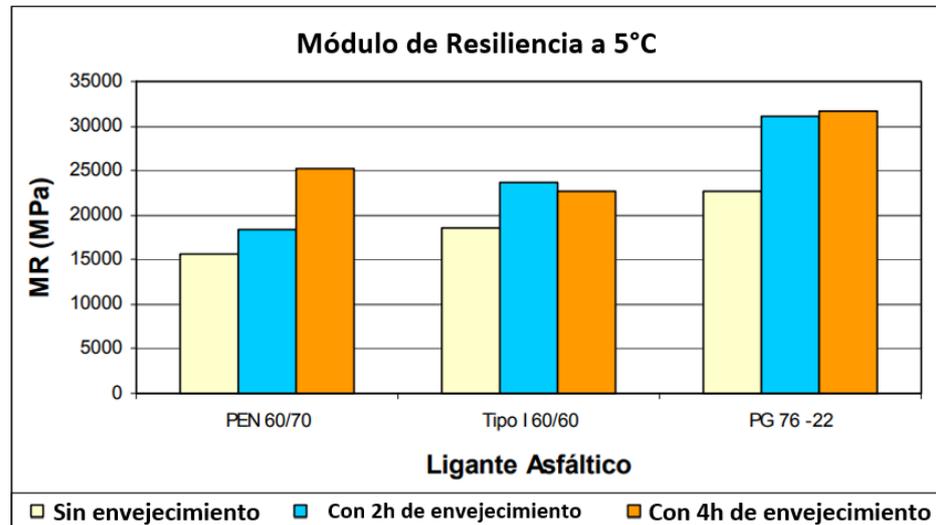


Figura N° 37: Variación de MR a 5°C en función de la condición de envejecimiento. Fuente: Escalante (2007).

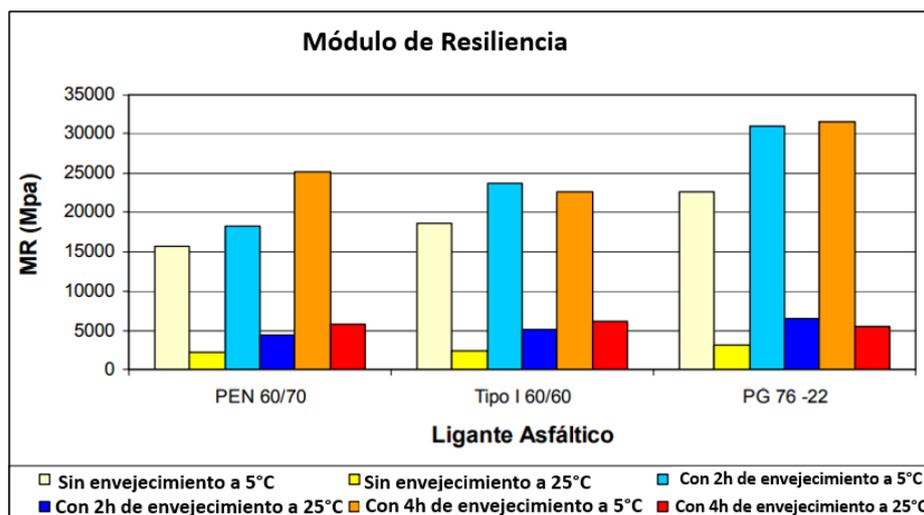


Figura N° 38: Variación del MR de las mezclas en función de la temperatura y condición del envejecimiento a corto plazo.

Fuente: Escalante (2007)

### Análisis Comparativo de Ensayo de vida de fatiga

La vida útil de la fatiga se expresa en función de la diferencia de tensiones, entre la tensión de tracción y compresión, y en función del parámetro de deformación resiliente. Los modelos de fatiga en función de las tensiones y la deformación resiliente calculada se presentan en las tablas 48, 49 y 50. Los parámetros resultantes de los ensayos de fatiga son presentados en las siguientes tablas, donde los coeficientes  $k_1$ ,  $k_2$  y  $n_1$  representan los parámetros de fatiga.

Tabla N° 37: Parámetros de los modelos de vida útil de Fatiga de las mezclas asfálticas sin

Ligante Asfáltico	RT	MR	MR/RT	$k_1$	$k_2$	$n_1$	$R^2$
CAP PEN 60/70	0,97	2135	2205	3490,8	4,2683	$6,0 \times 10^{-14}$	0,9788
AMP Tipo I 60/60	1,21	2335	1925	12779	4,6417	$5,0 \times 10^{-15}$	0,9814

envejecimiento.

Fuente: Escalante (2007)

Tabla N° 38: Parámetros de los modelos de vida útil de Fatiga de las mezclas asfálticas con 2h de envejecimiento.

Ligante Asfáltico	RT	MR	MR/RT	$k_1$	$k_2$	$n_1$	$R^2$
CAP PEN 60/70	1,29	4423	3419	26600	4,1743	$5,0 \times 10^{-14}$	0,9717
AMP Tipo I 60/60	1,65	5106	3092	158831	5,2113	$5,0 \times 10^{-18}$	0,9911

Fuente: Escalante (2007)

Tabla N° 39: Parámetros de los modelos de vida útil de Fatiga de las mezclas asfálticas con 4h de envejecimiento.

Ligante Asfáltico	RT	MR	MR/RT	k1	k2	n1	R <sup>2</sup>
CAP PEN 60/70	1,58	5750	3631	82292	4,8964	4,0x10 <sup>-17</sup>	0,9907
AMP Tipo I 60/60	1,78	6189	3479	458010	5,9932	2,0x10 <sup>-21</sup>	0,9887

Fuente: Escalante (2007)

En la Tabla 51 se presenta los resultados de los análisis mecánicos y la vida útil de fatiga para las mezclas asfálticas, en cada una de las condiciones de envejecimiento, para una carpeta asfáltica de 10 cm.

Tabla N° 40: Vida de fatiga de las mezclas asfálticas para una capa de 10cm en cada condición de envejecimiento.

Condición	Modelo	MR (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Δσ(Mpa)	N
<b>Ligante Asfáltico: CAP PEN 60/70</b>				
Sin envejecimiento	$N=3490.8(1/\Delta\sigma)^{4.2683}$	21353	0.8383	7411
Con 2h de envejecimiento	$N=26600(1/\Delta\sigma)^{4.1743}$	44229	1.2288	11255
Con 4h de envejecimiento	$N=82292(1/\Delta\sigma)^{4.8964}$	57502	1.3991	15894
<b>Ligante Asfáltico: AMP Tipo 1 60/60</b>				
Sin envejecimiento	$N=12779(1/\Delta\sigma)^{4.6417}$	23348	0.880	23131
Con 2h de envejecimiento	$N=158831(1/\Delta\sigma)^{5.2113}$	51058	1.3204	37317
Con 4h de envejecimiento	$N=458010(1/\Delta\sigma)^{5.9932}$	61893	1.4491	49588

Fuente: Escalante (2007)

En condiciones sin envejecimiento, la mezcla asfáltica con polímero SBS Tipo 1 es la que presenta un mejor resultado, siendo dos a tres veces mayores que los resultados con mezcla asfáltica convencional.

En condiciones con envejecimiento de 2 horas, las mezclas asfálticas modificadas son las que presentan un mejor resultado, siendo tres a

cinco veces mayores que los resultados con mezcla asfáltica convencional.

En condiciones con envejecimiento de 4 horas, también las mezcla asfálticas modificadas son las que presentan un mejor resultado, demostrando así que tienen un mejor comportamiento respecto a las mezclas asfálticas convencionales.

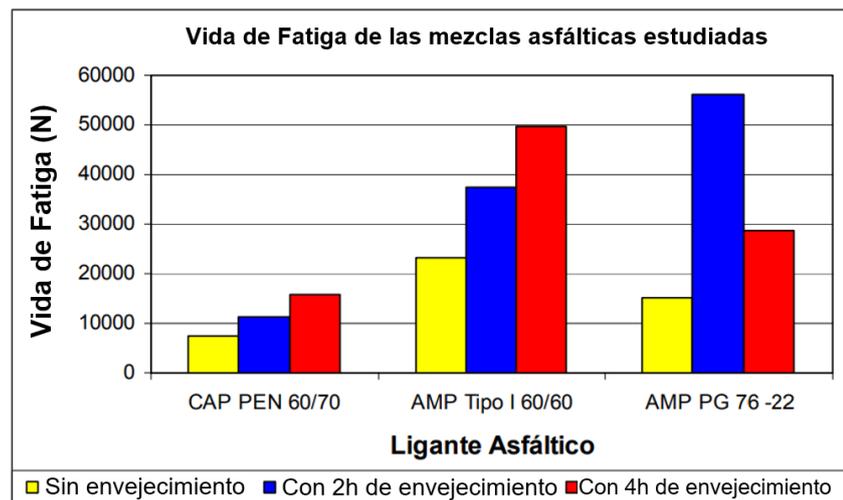


Figura N° 39: Vida de Fatiga de las mezclas asfálticas estudiadas.  
Fuente: Escalante (2007)