

**UNIVERSIDAD RICARDO PALMA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE TITULACIÓN POR TESIS**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**MEZCLA ASFALTICA MODIFICADA CON POLIMEROS SBS
PARA LA OPTIMIZACION DE LAS PROPIEDADES DE LA
MEZCLA ASFALTICA**

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

PRESENTADA POR

**Bach. ALARCON DAMIANO, DENIS GILMER
Bach. CÁRDENAS QUINTE, MARCO ANTONIO**

ASESOR: MSc. Ing. HUAMAN GUERRERO, NESTOR

LIMA – PERÚ

2021

DEDICATORIA

Dedico de manera muy especial a mis padres, Claudia y Bernardo, quienes me apoyaron incondicionalmente, pues gracias a sus consejos y motivación día tras día, logré llegar hasta esta instancia de mis estudios. Las palabras quedan cortas para expresar estos sentimientos, gracias mis amados padres.

También dedico a mi hermano Alex por darme el gran ejemplo a nivel profesional, su paciencia, sus consejos y apoyo moral, a mis hermanos Marco y Pedro por inspirarme a darles el ejemplo profesional.

Denis Gilmer Alarcon Damiano

Dedico esta tesis a mi Mamá Dina por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad; a mi padre por brindarme su comprensión y apoyo durante la carrera, a mis tíos Edgard y Yovana por apoyarme todos estos años y a toda mi familia y amigos en general por motivarme a culminar esta linda carrera.

Marco Antonio Cárdenas Quinte

AGRADECIMIENTO

Nuestro agradecimiento a Dios y a nuestra familia por brindarnos la posibilidad de culminar este proyecto. También agradecemos a la Universidad Ricardo Palma, a nuestros profesores y mentores por brindarnos su conocimiento, cultivar valores, virtudes y ética profesional.

Denis Alarcón y Marco Cárdenas

INDICE GENERAL

RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
INTRODUCCION	x
CAPITULO I: PLANTEAMIENTO Y DELIMITACION DEL PROBLEMA	1
1.1 Formulación y delimitación del problema	1
1.2 Problema general	2
1.3 Problemas específicos.....	2
1.4 Importancia y justificación del estudio.....	2
1.4.1 Importancia	2
1.4.2 Justificación	2
1.5 Objetivos.....	3
1.5.1 Objetivo General.....	3
1.5.2 Objetivos Específicos.....	3
CAPITULO II: MARCO TEORICO	4
2.1 Antecedentes del estudio de investigación	4
2.1.1 En el ámbito nacional.....	7
2.1.2 En el ámbito internacional	10
2.2 Bases teóricas vinculadas a la variable o variables de estudio	12
2.2.1 Pavimento flexible	12
2.2.2 Funciones de las capas de un pavimento flexible	12
2.2.3 Características que debe reunir un pavimento flexible.	13
2.2.4 Cemento Asfáltico de Petróleo (CAP).....	14
2.2.5 Origen del Cemento Asfáltico de Petróleo (CAP).....	15
2.2.6 Propiedades Químicas.....	17
2.2.7 Propiedades Físicas	17
2.2.8 Sistemas de clasificación de cementos Asfálticos	20
2.2.9 Polímeros	26
2.2.10 Polímeros tipo plastómeros.....	27
2.2.11 Polímeros tipo elastómeros	27
2.2.12 Agregados	28
2.2.13 Graduación y tamaño máximo de partícula	29
2.2.14 Dureza	29
2.2.15 Limpieza	30

2.2.16	Forma del agregado.....	30
2.2.17	Textura superficial	31
2.2.18	Capacidad de absorción	31
2.2.19	Afinidad con el asfalto	32
2.2.20	Mezcla asfáltica convencional	32
2.2.21	Ensayos para determinar las características y comportamiento de la mezcla asfáltica	32
2.2.22	Propiedades consideradas en el diseño de mezcla por el método Marshall.....	35
2.2.23	Ensayo Marshall.....	40
2.2.24	Mezcla asfáltica modificada con polímeros.....	43
2.2.25	Ensayos de desempeño de la mezcla asfáltica	51
2.2.26	Costos y Presupuestos.....	54
CAPITULO III: SISTEMA DE HIPOTESIS		56
3.1	Hipótesis	56
3.1.1	Hipótesis General.....	56
3.1.2	Hipótesis Especificas	56
3.1.3	Definición conceptual de variables	56
3.1.4	Operacionalización de las variables.....	¡Error! Marcador no definido.
CAPITULO IV: METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION.....		58
4.1	Tipo y Metodología de la Investigación	58
4.1.1	Método de Investigación	58
4.1.2	Diseño de investigación	58
4.1.3	Enfoque de investigación	58
4.1.4	Fuente de información	58
4.1.5	Tipo de investigación	58
4.1.6	Diseño de la investigación	58
4.1.7	Estudio del diseño	58
4.1.8	Población de estudio	59
4.2	Relación entre variables.....	59
4.2.1	Identificación de variables	59
4.3	Técnica e instrumentos de recolección de datos.....	59
4.3.1	Fuentes	59
4.3.2	Procedimiento para la recolección de datos.....	59

4.3.3	Técnicas de procesamiento y análisis de datos	60
CAPITULO V: PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACION		61
5.1	Resultados y Análisis comparativo entre el asfalto convencional y asfalto modificado con polímero Tipo SBS	61
5.1.1	Resultados de los ensayos para Cementos asfálticos Convencionales y Modificados AC – 20 (PEN 60/70)	61
5.1.2	Resultados de los ensayos para Cementos Asfálticos Convencionales y Modificados PEN 120/150.....	62
5.1.3	Análisis comparativo del Asfalto virgen y asfalto modificado con polímero SBS.....	63
5.1.4	Ensayos de desempeño de mezclas asfálticas	65
5.1.5	Estabilidad y flujo	67
5.2	Análisis comparativo Costo – Beneficio de las mezclas asfálticas	70
5.2.1	Análisis de costos del pavimento con polímero SBS por m3	76
5.2.2	Análisis del resultado costo-beneficio	78
5.3	Contrastación de hipótesis	79
5.3.1	Hipótesis específica 1	79
5.3.2	Hipótesis específica 2	79
5.3.3	Hipótesis específica 3	80
CONCLUSIONES		81
RECOMENDACIONES		82
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....		83
ANEXOS		85
	Anexo 1 :Matriz de Consistencia.....	85
	Anexo 2 :Operacionalización de Variables	86
	Anexo 3: Glosario.....	87

INDICE DE TABLAS

Tabla N°1.	Especificaciones para cementos asfálticos clasificados por su viscosidad a 60 °C.....	23
Tabla N°2.	Especificaciones para cementos asfálticos. Clasificados por su grado de penetración	25
Tabla N°3.	Especificaciones para cementos asfálticos. Equivalencias entre grado de penetración y grado de viscosidad	25
Tabla N°4.	Causas y Efectos de una Poca Durabilidad	37
Tabla N°5.	Causas y Efectos de la Permeabilidad.....	38
Tabla N°6.	Requisitos para mezcla de concreto bituminoso	42
Tabla N°7.	Panorama del mejoramiento producido en las propiedades de los ligantes por diferentes clases de polímeros	47
Tabla N°8.	Ensayos para Cementos asfálticos Convencionales y Modificados AC-20 (PEN 60/70)	61
Tabla N°9.	Resultados de los ensayos para cementos asfálticos convencionales y modificados PEN 120/150	62
Tabla N°10.	Ensayos de desempeño de mezclas asfálticas	65
Tabla N°11.	Tabla comparativa de resultados del Ensayo Marshall	67
Tabla N°12.	Porcentaje de incremento en la Estabilidad (MAMP SBS)	68
Tabla N°13.	Análisis de costos del pavimento asfáltico convencional por m2.....	70
Tabla N°14.	Costo colocación en obra de pavimento asfáltico convencional.....	71
Tabla N°15.	Análisis del costo del pavimento convencional por m3.....	72
Tabla N°16.	Análisis del costo de colocación en obra del pavimento asfáltico convencional	73
Tabla N°17.	Análisis de costo del pavimento con polímero SBS por m2.....	74
Tabla N°18.	Análisis del costo del pavimento asfáltico modificado colocado en obra	75
Tabla N°19.	Análisis del costo del pavimento asfáltico con polímero SBS colocado en obra.....	77
Tabla N°20.	Matriz de Consistencia.....	85
Tabla N°21.	Operacionalización de Variables.....	86

INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Estructura Pavimento Flexible (Asfalto).....	12
Figura N° 2: Ilustración esquemática de una refinería típica. La figura muestra el flujo de petróleo durante el proceso de refinación (p.11).....	16
Figura N° 3: Proceso Típico de Refinación	16
Figura N° 4: Viscosidad vs Temperatura (°C)	¡Error! Marcador no definido.
Figura N° 5: Equipo de penetración al asfalto	¡Error! Marcador no definido.
Figura N° 7: Máquina de ensayo de Los Ángeles.....	30
Figura N° 8: Textura del Agregado.....	31
Figura N° 9: Ilustración del VMA en una Probeta de Mezcla Compactada	34
Figura N° 10: Efecto de la incorporación de un polímero sobre la susceptibilidad térmica del asfalto Fuente: Montejo (2002, p.618).....	44
Figura N° 11: Porcentaje de Polímero vs Penetración.....	63
Figura N° 12: Porcentaje de polímero vs Punto de Ablandamiento	63
Figura N° 13: Porcentaje de polímero vs recuperación elástica	64
Figura N° 14: Porcentaje de polímero vs Ductilidad	64
Figura N° 15: Gráfico comparativo de las mezclas asfálticas convencionales y adicionadas con el polímero SBS.....	68
Figura N° 16: Gráfico comparativo del flujo en mezclas asfálticas convencionales y mezclas asfálticas modificada.	¡Error! Marcador no definido.
Figura N° 17: Gráfico Comparativo del precio unitario por m ³ entre la MAC y MAMP(SBS).....	78

RESUMEN

Esta investigación se realizó con la finalidad de poder dar a conocer los beneficios que se obtienen al agregar el polímero estireno-butadieno-estireno (SBS) al asfalto, estos beneficios se evidencian en el comportamiento mecánico y desempeño de la mezcla asfáltica, sabiendo que esta tecnología tiene ya varios años de aplicación internacionalmente brindando solución a la problemática que hoy tienen las carreteras del Perú, especialmente en lugares en los cuales están sometidas a climas extremos.

Obtenidas las fuentes bibliográficas, se procedió a identificar los ensayos que fueron realizados al cemento asfáltico de petróleo (CAP) y a la mezcla asfáltica, posteriormente se compararon los ensayos efectuados al cemento asfáltico de petróleo (CAP) sin modificar y modificado así mismo se realizó el mismo procedimiento de comparación con las mezclas asfálticas convencionales y mezclas asfálticas modificadas con el polímero SBS donde se evaluó el comportamiento mecánico y desempeño de ambas mezclas, del mismo modo se realizó la comparación de los costos de producción por metro cubico de la mezcla asfáltica convencional y modificada.

Los resultados obtenidos muestran mejoras significativas en el comportamiento mecánico y el desempeño de las mezclas asfálticas modificadas con el polímero SBS, en el aspecto económico se evidencio que las mezclas modificadas son más rentables a largo plazo debido a que no requerirán mantenimientos prematuros.

Palabras clave: Polímero SBS, mezclas asfálticas, cemento asfáltico de petróleo, comportamiento mecánico, desempeño.

ABSTRACT

This research was carried out in order to publicize the benefits obtained by adding the polymer styrene-butadiene-styrene (SBS), these benefits are evidenced in the mechanical behavior and performance of the asphalt mixture, knowing that this technology has already several years of application internationally providing a solution to the problems that today have the roads of Peru, especially in places where they are subject to extreme climates.

Once the bibliographic sources were obtained, the tests that were carried out on the petroleum asphalt cement (CAP) and the asphalt mixture were identified, later the tests carried out on the unmodified petroleum asphalt cement (CAP) were compared and modified, as well as the same comparison procedure was carried out with conventional asphalt mixtures and asphalt mixtures modified with the SBS polymer where the mechanical behavior and performance of both were evaluated. mixtures, in the same way the comparison of the production costs per cubic meter of the conventional and modified asphalt mixture was made.

The results obtained show significant improvements in the mechanical behavior and performance of the asphalt mixtures modified with the SBS polymer, in the economic aspect it was evidenced that the modified mixtures are more profitable in the long term because they will not require premature maintenance.

Key words: SBS polymer, asphalt mixtures, petroleum asphalt cement, mechanical behavior, performance.

INTRODUCCION

Al día de hoy las carreteras peruanas ubicadas en zonas de climas cálidos y fríos no cumplen la vida útil para la cual fueron diseñadas, esto se debe a que las mezclas asfálticas convencionales se ven severamente afectadas por la temperatura y el tránsito vehicular lo cual provoca fallas de deformación permanente y fatiga por lo tanto se afecta directamente a la transpirabilidad.

La tecnología de modificación con adición de polímeros a las mezclas asfálticas se viene implementando hace aproximadamente 50 años, haciendo que estas satisfagan las necesidades que requieren los asfaltos convencionales frente a los distintos climas que son sometidas e incrementando su vida útil. Esta tecnología ya ha sido implementada en países vecinos desde hace años, mientras que en el Perú se continúa usando mezclas asfálticas convencionales a pesar de que el Perú cuenta una gran diversidad de climas. Debido a esto se desarrolla esta investigación con el fin de demostrar mediante estudios bibliográficos, el beneficio del uso del polímero SBS en la mezcla asfáltica; la mejora de su comportamiento mecánico y desempeño, así también mediante un análisis costo-beneficio demostrar que las mezclas asfálticas modificadas son mucho más rentables a largo plazo que las mezclas convencionales.

Esta investigación se divide en 5 capítulos, en el capítulo 1 denominado, 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, para lo cual mencionamos al ensayo Marshall, debido a que sigue siendo el más utilizado para el diseño de mezclas asfálticas y este nos proporciona valores de estabilidad y fluencia que indican el comportamiento mecánico de la mezcla; en el capítulo 3, sistema de hipótesis, planteamos las hipótesis de la investigación y el sustento de las variables; en el capítulo 4, metodología de la investigación definimos el nivel, el tipo 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 realiza un análisis comparativo de los resultados de los ensayos realizados al cemento asfáltico de petróleo y a la mezcla asfáltica.

CAPITULO I: PLANTEAMIENTO Y DELIMITACION DEL PROBLEMA

1.1 Formulación y delimitación del problema

En las carreteras del Perú algunas de las principales fallas en los pavimentos asfálticos, son las deformaciones permanentes que viene a ser el resultado de las altas cantidades de repeticiones de carga que soporta el pavimento en el transcurso de los años, también se tiene que considerar el agrietamiento por fatiga y el de tipo térmico (por las gradientes de temperaturas) en las diferentes regiones ya sean cálidas o frías, y esto empeora más aun en aquellas vías donde el tránsito vehicular son muy altos.

Los pavimentos flexibles en el Perú muchas veces no cumplen con el tiempo de vida útil de acuerdo a los diseños. Debido a que las mezclas asfálticas convencionales son expuestas a los factores externos ya sean el clima y el tránsito vehicular.

Si bien es cierto el Perú cuenta con diferentes climas debido a la posición geográfica en el trópico, a la cordillera de los andes la cual configura una fisiografía compleja. Entre los climas de mayor extensión tenemos al árido y templado en la costa, lluvioso y frío en la sierra, y muy lluvioso y cálido en la selva. Por lo tanto, las mezclas asfálticas convencionales no tendrán un desempeño eficiente en la costa, sierra y selva del Perú.

El comportamiento del asfalto es elástico-lineal en bajas temperaturas y frecuencias de cargas altas y en zonas de altas temperaturas (costa y selva) desarrolla propiedades visco-elásticas y visco-plásticas pudiendo desarrollar deformaciones permanentes al recibir cargas repetidas del tránsito.

En la actualidad existe una amplia variedad de productos que modifican el asfalto convencional y con ello mejorar el desempeño del pavimento, una de las alternativas más utilizadas en las mezclas asfálticas son los polímeros SBS (estireno butadieno estireno). En efecto, existe una necesidad de construir pavimentos que ofrezcan altos niveles de desempeño a lo largo de su vida útil ya que sería de gran beneficio social, dados los altos costos de reparación y mantenimiento de los pavimentos.

1.2 Problema general

¿En qué medida la mezcla asfáltica modificada con polímero SBS optimiza las propiedades, desempeño y el costo del pavimento flexible en climas cálidos y fríos del Perú?

1.3 Problemas específicos

- a) ¿Cuánto mejorara las propiedades del asfalto modificado con polímero SBS a comparación del asfalto convencional para su uso en zonas cálidas y frías?
- b) ¿Cuánto mejorara el desempeño, estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica modificada con polímero SBS a comparación de una mezcla asfáltica convencional en zonas cálidas y frías?
- c) ¿Cuál será la rentabilidad de utilizar mezclas asfálticas modificadas con polímeros?

1.4 Importancia y justificación del estudio

1.4.1 Importancia

La importancia de esta investigación es fomentar la aplicación de mezclas asfálticas modificadas con polímeros SBS en zonas cálidas y frías del país, ya que las mezclas asfálticas convencionales muchas veces no cumplen con la vida útil para el cual fueron diseñados presentando deformaciones permanentes y agrietamiento por fatiga, entre otros daños, ocasionando un mal desempeño del pavimento lo cual genera inseguridad en el tránsito.

Lo que se desea con la modificación de las mezclas asfálticas es darle mayor tiempo de vida útil a los pavimentos, logrando reducir costo de mantenimientos prematuros y reparaciones en los pavimentos flexibles. Brindando seguridad a los ciudadanos que se transporten para prevenir accidentes.

1.4.2 Justificación

La presente investigación se justifica con el estudio bibliográfico de tesis nacionales e internacionales y artículos de investigación donde realizaron ensayos de mezclas asfálticas modificadas con polímeros SBS donde se recaudará los resultados obtenidos de la aplicación en zonas cálidas y frías del Perú.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Determinar la influencia de la mezcla asfáltica modificada con polímero SBS para la optimización de las propiedades del asfalto, el desempeño y costos de la mezcla asfáltica en climas cálidos y fríos del Perú, año 2021

1.5.2 Objetivos Específicos

- a) Comparar las propiedades del asfalto virgen y asfalto modificado con polímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) para su uso en zonas cálidas y frías.
- b) Comparar el desempeño, estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica convencional y la mezcla asfáltica modificada con polímero SBS para su uso en zonas cálidas y frías
- c) Determinar la rentabilidad de utilizar mezclas asfálticas modificadas con polímeros haciendo un análisis de costo – beneficio para la optimización de costos.

CAPITULO II: MARCO TEORICO

2.1 Antecedentes del estudio de investigación

Canevarolo (2006), desarrolló un libro llamado “Ciencia de polímeros”, en este texto se indica que la palabra polímero se originó del griego poli(muchos) y mero (unidad de repetición). Un polímero es una macromolécula que está compuesta por muchas unidades de repetición denominadas meros que están unidas por enlaces covalentes. Para poder producir un polímero la materia prima requerida es el monómero, una molécula con una unidad de repetición. Dependiendo del monómero utilizado, del número medio de meros por cadena y del tipo de enlace covalente se podrá dividir los polímeros en tres grupos: Plásticos, Cauchos y Fibras (p.21).

Rodríguez (2008), desarrolló la tesis titulada “Análisis de pavimento asfáltico modificado con polímero”, para obtener el título de Ingeniero Constructor en la Universidad Austral de Chile, realizó un análisis de pavimento asfáltico modificado con polímero, en el cual expone antecedentes históricos sobre las primeras aplicaciones y usos de los asfaltos modificados con polímero y las capas asfálticas estructurales. Los asfaltos modificados fueron utilizados inicialmente en las emulsiones para impermeabilizantes y luego se emplearon en la pavimentación; en riegos como tratamientos superficiales en frío, y posteriormente se comenzó a modificar el cemento asfáltico para utilizarse cuando se necesitaba un asfalto de mayor resistencia o calidad que la que ofrecía un cemento asfáltico convencional. Los polímeros son sustancias de alto peso molecular formada por la unión de miles de moléculas pequeñas llamadas monómeros (compuestos químicos con moléculas simples). De esta manera se forman así moléculas gigantes que toman diversas cadenas en forma de escalera, estas cadenas unidas o termo fijadas no pueden ablandarse al ser calentadas, cadenas largas y sueltas.

Existen modificadores poliméricos que dieron buenos resultados los cuales se detallan a continuación.

- Elastómeros: Al estirarlos se sobrepasa la tensión de fluencia, no regresando a su longitud original al terminar la sollicitación. Este modificador llega a obtener deformaciones casi plásticas con poca elasticidad.
- Copolímeros: Tienen varias unidades estructurales distintas (SBS, EVA).

- Homopolímeros: Tienen una sola unidad estructural (monómeros).

Los asfaltos modificados son el producto de la disolución o adición en el asfalto, de un polímero o de caucho molido de llantas, que son sustancias estables a través del tiempo y a cambios de temperatura, que son añadidos al asfalto para poder modificar sus propiedades físicas y reológicas y al mismo tiempo disminuir su susceptibilidad a la temperatura y a la humedad, así como a la oxidación.

Rodríguez (2008) nos manifiesta que:

La manera que estos modificadores actúan se da a nivel iónico y esto hace que se incremente la adherencia en la interfase entre el material pétreo y el material asfáltico, conservándola aun en presencia del agua. De la misma manera se aumenta la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y a los esfuerzos de tensión repetidos, por lo tanto, a la fatiga y con esto se reducen los agrietamientos y la susceptibilidad térmica. Por lo general los modificadores se aplican directamente al material asfáltico antes de ser mezclado con el material pétreo.

Está comprobado que los asfaltos convencionales llegan a obtener propiedades satisfactorias tanto mecánicas como de adhesión en un gran abanico de aplicaciones y bajo distintas condiciones climáticas y de tráfico. Sin embargo en la actualidad los grandes volúmenes de tráfico sobre los criterios de diseño vehicular y el exceso de carga, así también el incremento de la presión en los neumáticos de los vehículos, las condiciones climáticas hacen que el empleo de estos asfaltos convencionales no llegue a satisfacer las expectativas tales como cumplir un determinado periodo de servicio, esto se traduce como una menor resistencia al envejecimiento, poca durabilidad del pavimento reflejándose en fisuraciones y deformaciones dentro de la carpeta asfáltica, pero estos problemas también son causados por un mal proceso constructivo, una mala selección de materiales en los diseños, falta total de mantenimiento en la vía y una baja calidad del ligante y la necesidad de optimizar las inversiones, todo esto provoca que algunos casos las propiedades del asfalto convencional den resultados insuficientes.

Por ejemplo, con asfaltos convencionales, aún con los grados más duros no es posible eliminar el problema de las deformaciones que se producen por el tránsito, especialmente cuando se afrontan condiciones de temperatura alta. Además, con asfaltos con mayor dureza se corre el riesgo de formaciones de agrietamientos por efectos térmicos cuando las temperaturas son muy bajas.

Bustos, Sosa, Rodríguez, & Calderón (2018) nos indican que:

El 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. 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. Adicionalmente se ha reportado que los grupos de estireno tienen una temperatura de fusión alrededor de 90°C y regiones de polibutadieno con temperatura de transición vítrea alrededor de -90°C. En general, 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. Sin embargo, estas características le permiten ser usado en regiones de baja y alta temperatura. 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. Por otra parte, Gordon A. sugiere que las concentraciones adecuadas de este polímero en el asfalto generalmente oscilan entre 5 y 7% en masa, sin embargo, Soenen, y otros reportan que esta entre 3 y 9% p/p de la mezcla. Cuando el SBS se mezcla con el asfalto, la fase elastómera del copolímero absorbe los máltenos (fracciones de aceite), influyendo en dos aspectos principales, primero modifica la manejabilidad y el envejecimiento del asfalto y segundo se hincha formando finalmente dos partes; la fase asfáltica y la fase SBS. Lo que conduce a una fase polimérica continua que se forma a través del asfalto modificado con polímero cambiando significativamente las propiedades reológicas del asfalto base.

Alam S. y Hossain Z. encontraron que esta modificación influye en el aumento de asfáltenos, por lo tanto, aumenta la rigidez y su viscosidad. Este polímero debido a sus características se emplea frecuentemente para aumentar los valores de viscosidad cinemática y dinámica de los aglutinantes del asfalto, lo que influye en la mejora del rendimiento a bajas temperaturas. (Bustos, Sosa, Rodríguez, & Calderón, 2018, p.64)

Huamán & Chang (2015) manifiestan que:

La solución más evidente es mejorar las propiedades de los asfaltos para mejorar su comportamiento y desempeño. En el Perú uno de los principales problemas es mejorar la tecnología de las mezclas asfálticas para que estas puedan alcanzar su vida útil en cualquier zona y clima del país, se sabe que por la geografía que presenta el territorio peruano existen zonas con bajas y altas temperaturas como son la selva alta y baja; así como en la franja costera aproximadamente 3,000 km. a lo largo del océano pacífico, especialmente en la temporada de verano se logran alcanzar temperaturas de 40°C bajo la sombra. Esto genera que las carpetas asfálticas sean sometidas a temperaturas muy altas, haciéndolas propensas a fallar por deformación permanente, esto debido a la susceptibilidad térmica que presenta el asfalto.

2.1.1 En el ámbito nacional

Balbín & Enríquez (2020) en su investigación titulada:

“Influencia de la mezcla asfáltica modificada con polímeros en zonas cálidas de Perú”, pudieron dar a conocer las mejoras en el desempeño y comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica adicionando polímeros, de esta manera se promueve el uso de los polímeros en el Perú y específicamente en zonas en las que la carpeta asfáltica se encuentra sometida a altas temperaturas.

Los resultados que obtuvieron mostraron mejoras significativas en el desempeño y comportamiento mecánico que fueron modificadas con polímeros SBS y SBR, y también visto desde un punto de vista económico estas mezclas modificadas resultaron ser rentables a largo plazo ya que no requieren de un mantenimiento prematuro en comparación con las mezclas asfálticas convencionales.

Huamán & Huauya (2020) en su investigación indican que:

“Cálculo de un pavimento flexible con mezcla asfáltica incorporando polímero (SBS) para el distrito de Villa El Salvador”, Al realizar los cálculos para el diseño de un pavimento flexible con mezcla asfáltica incorporando el polímero SBS en el distrito de Villa el Salvador-Lima, una de las conclusiones a la cual llegaron es que incorporando el polímero SBS ofrece un excelente coeficiente de fricción superficial, poca deformación permanente y una gran resistencia a la tracción. Además, en cuanto a las características de la mezcla asfáltica con polímero SBS utilizando el método Marshall se evidenció que mejora la estabilidad y flujo, de esta manera también obtuvieron resultados aplicando dos ensayos de desempeño (Rueda de Hamburgo) y Vida a la Fatiga, en donde pudieron determinar que el comportamiento y características del asfalto modificado mejoran de manera significativa a diferencia del asfalto convencional.

Huamán (2020) en su investigación sustenta que:

“Comportamiento de las propiedades de la mezcla asfáltica modificada con el uso de polímero SBS en la Avenida Cesar Canevaro, San Juan de Miraflores, Lima - 2019”, tuvieron como objetivo principal determinar el análisis comparativo de las mezclas asfálticas con el uso de polímero SBS y las mezclas asfálticas convencionales, cabe resaltar que esta investigación usó el método experimental de tipo aplicativo y de nivel descriptivo.

La conclusión final a la que llegaron fue que la mezcla asfáltica modificada con polímeros SBS, tiene un notable mejoramiento en sus propiedades con lo cual la carpeta asfáltica se beneficia en el sentido que disminuye las fallas en el pavimento y además aumenta notablemente la durabilidad a las condiciones climatológicas.

Zambrano (2018) en su investigación sustenta que:

“Evaluación del comportamiento del asfalto modificado con polímeros utilizados en la vía asfaltada Macusani – Ollaeschea KM 182+250 al KM 188+300”, Indican que de todos los problemas que pueden afectar a la carpeta asfáltica los principales son: la oxidación (envejecimiento), una constante deformación, las grietas, de esta manera no consideran la contaminación ocasionada por subproductos generada por las llantas de los vehículos. Esta investigación demuestra que la adición de polímeros en las mezclas asfálticas

en la vía Macusani – Ollaechea mejora sus parámetros reológicos y propiedades físico mecánicas. Para poder llegar a estas conclusiones y cumplir con los objetivos realizaron un análisis experimental mediante la evaluación del asfalto sin modificar y el asfalto con adición de polímero SBS al 2%, 2.5%, 3% y 4%.

El asfalto modificado con polímero SBS al 3% cumplió con los requerimientos especificados por las normas ASTM, el ensayo de penetración 25°C tuvo un valor de 75 dm, el punto de ablandamiento se alcanzó a una temperatura de 59°C y para la recuperación elástica por torsión llegaron a obtener un 75% y una recuperación elástica lineal de 80%, en cuanto a la ductilidad para este asfalto modificado fue de 30 cm y para la estabilidad de almacenamiento se alcanzó una temperatura de 3°C.

En cuanto al ensayo Marshall los resultados que llegaron a obtener indicaron que se optimizó las características del asfalto, todo esto teniendo como uno de los factores más importantes al clima ya que es uno de los principales causantes de las fallas en los pavimentos.

Chávez (2017) en su investigación nos indica que:

“Análisis de la carpeta asfáltica modificada con polímero SBS en el clima frígido de la región Junín – Yauli 2017”, Esta investigación fue realizada con el fin de estudiar el desempeño de las mezclas asfálticas en un clima frígido, para esto analizaron la mezcla asfáltica modificada con polímeros SBS, el tipo de estudio que realizaron fue aplicativo y tiene un diseño experimental. Los resultados que llegaron a obtener mostraron que el uso de mezclas asfálticas modificadas con polímeros presenta mejoras en su estabilidad respecto a las mezclas convencionales, también obtuvieron que existe un esfuerzo mayor en tensión respecto a las mezclas convencionales y al final concluyeron que si existe una mejora a la resistencia y reducción de la susceptibilidad a la humedad al utilizar un cemento asfáltico incorporando polímeros SBS.

Valdivia (2017) en su investigación nos indica que:

“Análisis del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas en caliente incorporando polímeros SBS en la Av. Universitaria cuadra 53 al 57 – Comas, Lima 2017”, Esta investigación fue realizada con el fin de estudiar el desempeño de las mezclas asfálticas en un clima frígido, para esto analizaron la mezcla asfáltica modificada con polímeros SBS, el tipo de estudio que

realizaron fue aplicativo y tiene un diseño experimental. Los resultados que llegaron a obtener mostraron que el uso de mezclas asfálticas modificadas con polímeros presenta mejoras en su estabilidad respecto a las mezclas convencionales, también obtuvieron que existe un esfuerzo mayor en tensión respecto a las mezclas convencionales y al final concluyeron que si existe una mejora a la resistencia y reducción de la susceptibilidad a la humedad al utilizar un cemento asfáltico incorporando polímeros SBS.

2.1.2 En el ámbito internacional

Borja y Cardenas (2019) en la tesis “Caracterización de mezclas asfálticas en caliente, elaboradas con el uso de cemento asfáltico modificado con polímero SBR y SBS” manifestaron que:

El comportamiento de las mezclas asfálticas modificadas con polímero SBS y SBR han tenido mejoras significativas a comparación de las mezclas convencionales, de acuerdo a los ensayos normalizados como estabilidad y flujo Marshall, pérdida por desgaste y tracción indirecta realizados se evidenciaron 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 y por último 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.

Acosta y Herrera (2016) en su trabajo de investigación “Uso de polímeros tipo III para mejorar la durabilidad y el comportamiento de las mezclas asfálticas (MDC-19) empleadas en zonas cálidas” indicaron que:

La incorporación de polímeros en las mezclas asfálticas mejora notablemente las propiedades físicas y reológicas de los asfaltos convencionales donde la principal finalidad en zonas cálidas es contar con ligantes más viscosos para reducir las deformaciones permanentes de las mezclas que componen las capas de rodadura, aumentando la rigidez. Además, se llegó a la conclusión de que las mezclas asfálticas modificadas con polímeros inicialmente tienen un mayor costo que la convencionales. Sin embargo, al hacer un análisis de costo a largo plazo se concluyó que es rentable la inversión de la mezcla

asfáltica modificada con polímero ya que se evitara los mantenimientos prematuros y se alargara el tiempo de vida útil.

López y Velos (2013) en la tesis “Análisis comparativo de mezclas asfálticas modificadas con polímeros SBR y SBS, con agregados provenientes de la cantera de Guayllabamba” nos indican que:

Tuvieron como finalidad brindar a los lectores una guía básica del uso de mezclas asfálticas con la incorporación de polímeros y los procedimientos detallados que se deben realizar para los ensayos de caracterización de agregados pétreos, asfalto y emulsión asfáltica. Donde llegaron a la conclusión de que la mezcla asfáltica en caliente con la incorporación de polímero SBS obtuvieron un incremento en la estabilidad de 88.10% y el flujo del 13.33%, mientras que la mezcla en frío modificada con polímero SBR su incremento fue de 3.68% en estabilidad y 3.70% en flujo, donde notoriamente la mezcla en caliente mejora sus características, en cambio la mezcla en frío mejora sus características, pero no son tanto como la mezcla asfáltica en caliente con polímero SBS.

Villegas, Aguair y Loria (2018) en su investigación “Diseño de mezclas asfálticas con materiales desecho” indicaron que:

Existe poca gestión de residuos biodegradables que vienen de la industria. Costa Rica posee el 5% de la biodiversidad del mundo por tal razón tiene que salvaguardar su industria turística. En su investigación usaron desechos tales como bolsas de polietileno, polipropileno y bumper de coches como posibles modificadores de las mezclas asfálticas convencionales. Donde se analizaron las propiedades de los modificantes con un análisis físico-químico y el desempeño se analizó con la deformación permanente por fatiga, para las mezclas asfálticas se realizaron ensayos de deformación permanente con el Análisis de Pavimentos Asfálticos (APA), se verificó la rigidez de la mezcla mediante el Módulo Resiliente a la Tensión Indirecta y se estudió la resistencia al daño por humedad con base en la Resistencia Retenida a la Tensión Diametral. Donde los resultados obtenidos mostraron un mejor comportamiento de la mezcla asfáltica modificada al optimizar la deformación permanente y al daño por humedad.

2.2 Bases teóricas vinculadas a la variable o variables de estudio

2.2.1 Pavimento flexible

Este tipo de pavimentos están formados por una carpeta bituminosa apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la subbase. No obstante, puede prescindirse de cualquiera de estas capas dependiendo de las necesidades particulares de cada obra. En la Figura N°1 se muestra un corte típico de un pavimento flexible.

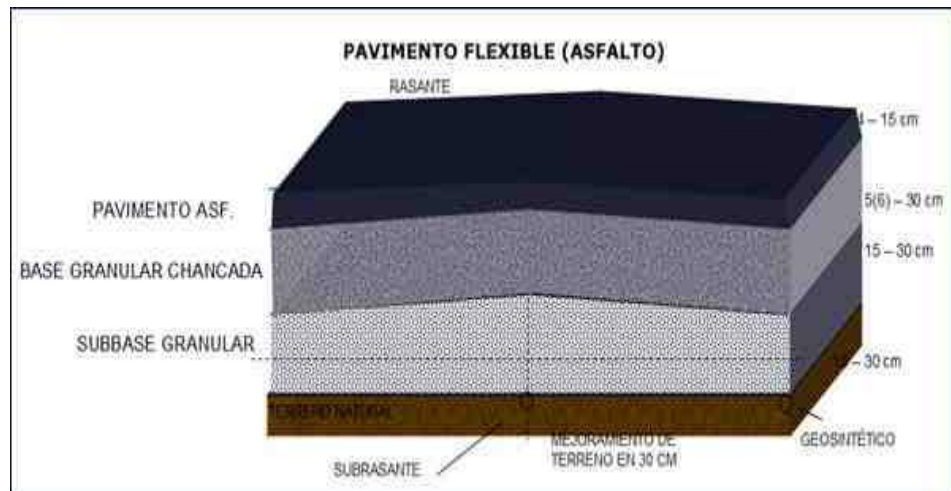


Figura N°1: Estructura Pavimento Flexible Asfalto

Fuente: Asphalt Institute

2.2.2 Funciones de las capas de un pavimento flexible

Según (Montejo, 2002) nos indica que se divide en los siguientes:

Sub base granular, Capa de transición, La sub base bien diseñada impide la penetración de los materiales que constituyen la base con los de la subrasante y, por otra parte, actúa como filtro de la base impidiendo que los finos de la subrasante la contaminen menoscabando su calidad.

- Disminución de las deformaciones. Algunos cambios volumétricos de la capa subrasante, generalmente asociados a cambios en su contenido de agua (expansiones), o a cambios extremos de temperatura (heladas), pueden absorberse con la capa subbase, impidiendo que dichas deformaciones se reflejen en la superficie de rodamiento.

- Resistencia. La subbase debe soportar los esfuerzos transmitidos por las cargas de los vehículos a través de las capas superiores y transmitidos a un nivel adecuado a la subrasante.
 - Drenaje. En muchos casos la subbase debe drenar el agua, que se introduzca a través de la carpeta o por las bermas, así como impedir la ascensión capilar.
- a) Base granular
- Resistencia. La función fundamental de la base granular de un pavimento consiste en proporcionar un elemento resistente que transmita a la subbase ya la subrasante los esfuerzos producidos por el tránsito en una intensidad apropiada. .
- b) Carpeta de rodadura
- Superficie de rodamiento. La carpeta debe proporcionar una superficie uniforme y estable al tránsito, de textura y color conveniente y resistir los efectos abrasivos del tránsito.
 - Impermeabilidad. Hasta donde sea posible, debe impedir el paso del agua al interior del pavimento.
 - Resistencia. Su resistencia a la tensión complementa la capacidad estructural del pavimento.

2.2.3 Características que debe reunir un pavimento flexible.

Según (Montejo, 2002) nos indica que:

Un pavimento para cumplir adecuadamente sus funciones debe reunir los siguientes requisitos:

- Ser resistente a la acción de las cargas impuestas por el tránsito.
- Ser resistente ante los agentes de intemperismo.
- Presentar una textura superficial adaptada a las velocidades previstas de circulación de los vehículos, por cuanto ella tiene una decisiva influencia en la seguridad vial. Además, debe ser resistente al desgaste producido por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.
- Debe presentar una regularidad superficial, tanto transversal como longitudinal, que permitan una adecuada comodidad a los usuarios

en función de las longitudes de onda de las deformaciones y de la velocidad de circulación.

- Debe ser durable.
- Presentar condiciones adecuadas respecto al drenaje.
- El ruido de rodadura, en el interior de los vehículos que afectan al usuario, así como en el exterior, que influye en el entorno, debe ser adecuadamente moderado.
- Debe ser económico.
- Debe poseer el color adecuado para evitar reflejos y deslumbramientos, y ofrecer una adecuada seguridad al tránsito.

2.2.4 Cemento Asfáltico de Petróleo (CAP)

Asphalt Institute (1982) lo define al 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).

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. (pp. 253)

2.2.5 Origen del Cemento Asfáltico de Petróleo (CAP)

Asphalt Institute (1982) lo define el asfalto como:

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° 2, 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. (pp 253)

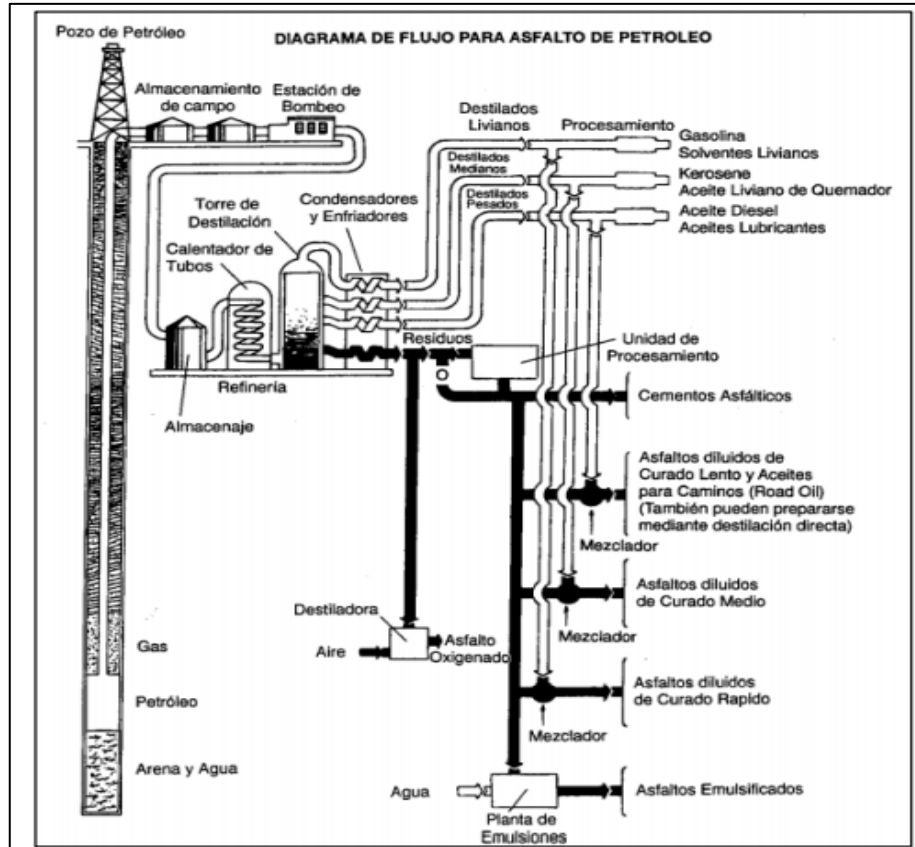


Figura N°2: Ilustración esquemática de una refinería típica
Fuente: Asphalt Institute (1982)

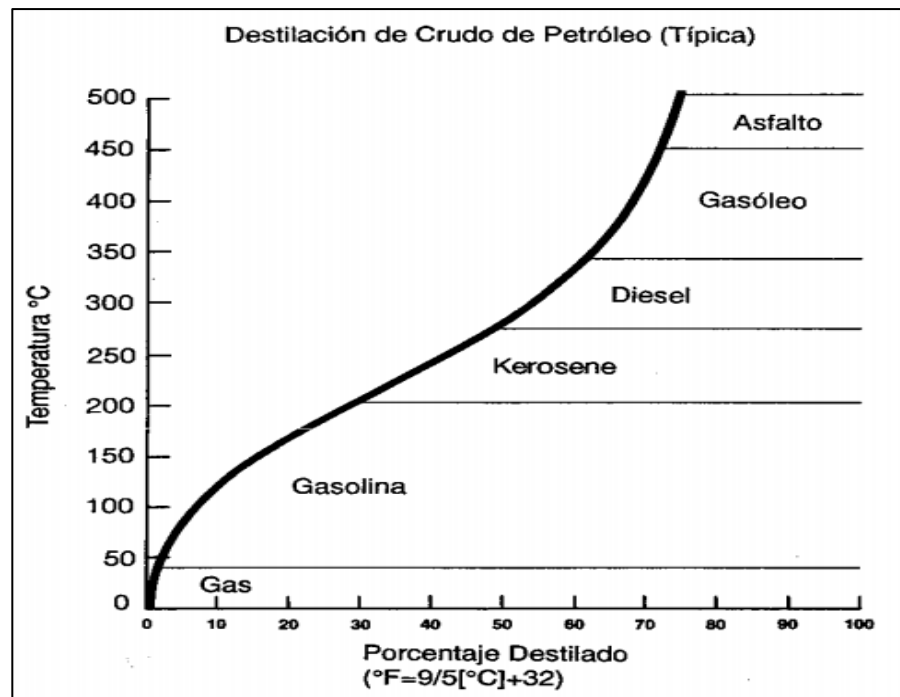


Figura N°3: Proceso de Temperaturas Típicas de refinación
Fuente: Asphalt Institute (1982)

2.2.6 Propiedades Químicas

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: asfáltenos y máltenos, mientras que los aceites actúan como un medio de transporte para los asfáltenos y las resinas:

Asfáltenos: Los asfáltenos no se disuelven en el heptano. Una vez separados de los máltenos, son usualmente de color negro o pardo oscuro y se parecen al polvo grueso de grafito. Los asfáltenos le dan al asfalto su color y dureza.

Máltenos: Los máltenos 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 asfáltenos 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. (pp. 17)

2.2.7 Propiedades Físicas

Asphalt Institute (1982) indica que:

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

- **Durabilidad**
Es la medida de qué tanto puede retener un asfalto sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento. (pp. 17)
- **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. (pp.17)
- **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. (pp.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. (pp.20)
- **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 (cuando el asfalto se combina con el oxígeno), el cual ocurre más fácilmente a altas temperaturas y en películas delgadas de asfalto. (Institute Asphalt, 1982)
El asfalto se encuentra a altas temperaturas y en películas delgadas mientras está revistiendo las partículas de agregado durante el mezclado.

Esto hace que la oxidación y el endurecimiento más severo ocurran en esta etapa de mezclado. La figura 5 se muestra el aumento en viscosidad debido al calentamiento de una película delgada de asfalto. El margen de viscosidad del material original (antes de la prueba de película delgada en horno rotatorio – RTFO) es mucho menor que el margen obtenido después del calentamiento. (pp. 20)

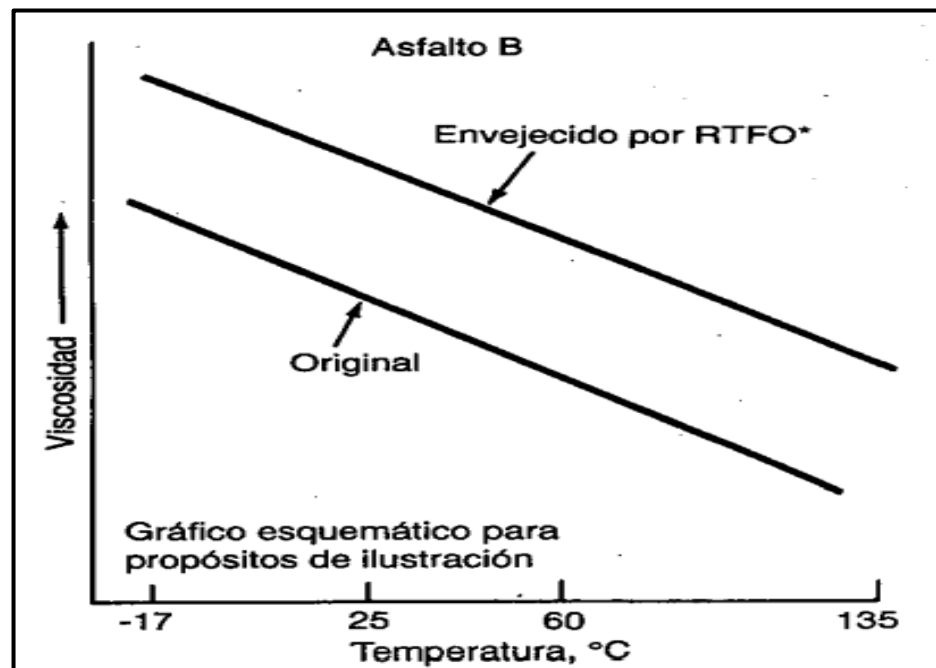


Figura N°4: Endurecimiento del asfalto luego de haber exponerse a

altas temperaturas.

Fuente: Asphalt Institute (1982)

No todos los asfaltos se endurecen a la misma velocidad cuando son calentados en películas delgadas. Por lo tanto, cada asfalto debe ser ensayado por separado para poder determinar sus características de envejecimiento. Estos ajustes incluyen mezclar el asfalto con el agregado a la temperatura más baja posible, y durante el tiempo más corto que pueda obtenerse en la práctica. (pp.20)

El endurecimiento del asfalto continua en el pavimento después de la construcción. Una vez más, las causas principales son la oxidación y la polimerización. Estos procesos pueden ser retardados si se mantiene, en el pavimento terminado, una cantidad pequeña de vacíos (de aire) interconectados, junto con una capa gruesa de asfalto cubriendo las partículas de agregado. (pp. 21)

2.2.8 Sistemas de clasificación de cementos Asfálticos

El asfalto puede ser caracterizado de tres maneras, según el reglamento técnico centroamericano RTCA 75.01.22:047. Estas formas de caracterizar el asfalto resultan útiles si la interpretación de los resultados es apropiada, el asfalto de puede caracterizar por grado de viscosidad, por grado de penetración y por grado de desempeño. Independientemente de cada caracterización intenta evaluar la consistencia del asfalto a una o varias temperaturas, así como evaluar propiedades relacionadas con pureza, susceptibilidad al envejecimiento y seguridad. (Salazar, 2011, pág. 26)

Con los años, ha habido una serie de métodos para la clasificación de cemento asfáltico. Hasta finales de los años 1980 eran frecuentes los métodos de clasificación por la penetración y viscosidad. En los años 1990 este sistema cambia al superpave SHRP y mejorado en la actualidad, casi todos los estados en Estados Unidos utilizan sistema de clasificación Superpave. Algunos estados han incorporado pequeñas desviaciones de las especificaciones AASHTO. Por ejemplo, Texas usa un PG y más pliego de condiciones que añade algunos requisitos tradicionales a Superpave. (Mendez, 2012, pág. 86)

- Por viscosidad

En la década de 1960, la FHWA, ASTM, AASHTO, la industria, y una serie de organismos de carreteras en EE. UU empiezan a clasificar los asfaltos de acuerdo a su viscosidad mediante la norma ASTM D3381 “Especificación Estándar para la clasificación de cementos asfálticos por viscosidad para su uso en la construcción de pavimentos”. Esta especificación incluye cinco grados de viscosidad que van desde un asfalto duro clasificado en “AC-40” a un cemento asfáltico en suave “ac-2.5”. Aproximadamente al mismo tiempo, el departamento de carreteras de california (Caltrans) estaba desarrollando un sistema de clasificación en función de la viscosidad con el residuo envejecido AR. Esta especificación incluye 5 grados de viscosidad AR que van desde un asfalto duro clasificado en “AR-160” a un cemento asfáltico suave clasificado en “AR-10”. (Mendez, 2012, pág. 87)

La Tabla N° 1 muestra las especificaciones para cementos asfálticos clasificados por grado de viscosidad a 60 °C (Tabla 1B del RTCA) Se

recomienda que la cantidad de muestra necesaria para la realización de las pruebas es un galón de asfalto (3,79 Litros), pese a que los ensayos podrían realizarse con muestras de menor tamaño. Adicionalmente es recomendable contar con una muestra testigo en caso de requerir verificar posteriormente alguna propiedad. (Salazar, 2011, pág. 26)

El principio fundamental de la caracterización por grado de viscosidad es determinar la viscosidad absoluta a 60 °C y asignar como resultado o consistencia obtenida el grado AC correspondiente, para luego verificar los demás requisitos para este grado AC (por ejemplo, AC30) en el resto de ensayos especificados. (Salazar, 2011, pág. 26)

Los ensayos específicos son:

- Viscosidad a 60 °C (ASTM D2171).

Esta es una propiedad fundamental del asfalto para cuantificar su consistencia a la temperatura de 60 °C, adicionalmente se utiliza para valorar el efecto de la temperatura en el comportamiento del material para proponer el rango de temperaturas en la producción de la mezcla asfáltica y su colocación. (Importante: $1 \text{ P} = 10 \text{ Pa}\cdot\text{s}$). (Salazar, 2011, pág. 26)

- Viscosidad Cinemática a 135 °C (ASTM D2170).

Esta información también es una propiedad fundamental del asfalto, determina el comportamiento del material con respecto a la temperatura, de esta forma se garantizan condiciones adecuadas para el almacenamiento del asfalto, transporte y bombeo, además este parámetro se utiliza en el cálculo de temperaturas de mezclado y compactación, junto al ensayo de viscosidad absoluta a 60 °C. (Importante: $1 \text{ cSt} = 1 \text{ mm}^2/\text{s}$). (Salazar, 2011, pág. 26)

- Penetración a 25 °C (ASTM D 5).

La prueba de penetración es otro método para cuantificar la consistencia del asfalto, también utilizada como guía y para caracterizar asfaltos por grado de penetración. En general asfaltos blandos tendrán penetraciones mayores que los más rígidos. Los ensayos de penetración fueron utilizados dentro de las primeras

metodologías de clasificación de asfaltos y aun se siguen utilizando. (Salazar, 2011, pág. 27)

- Punto de inflamación con copa abierta Cleveland (ASTM D92).

La prueba de punto de inflamación es un parámetro muy importante como consideración de almacenaje y transporte, ya que indica la temperatura mínima a la cual el asfalto empieza a generar vapores potencialmente inflamables, generando así riesgos de fuego. (Salazar, 2011, pág. 27)

- Solubilidad en tricloroetileno (ASTM D70).

El ensayo de solubilidad determina el contenido de asfalto en el asfalto original. La porción de asfalto soluble en tricloroetileno está constituida por los elementos aglomerantes activos, la parte insoluble es considerada materia inerte y posiblemente de naturaleza inorgánica. Es una forma de identificar el porcentaje de contaminantes en el asfalto. (Salazar, 2011, pág. 27)

- Efecto del calor y el aire en materiales asfálticos mediante el horno de película delgada TFO. (ASTM D1754).

Este ensayo se emplea para evaluar la susceptibilidad al endurecimiento o envejecimiento de tendría el asfalto durante las operaciones de mezclado, cuando se realiza esta prueba se debe reportar el resultado obtenido, de esta manera se puede expresar el resultado como pérdida de masa (al usar signo negativo) o ganancia de masa (utilizando signo positivo). Esta tendencia al endurecimiento o envejecimiento se mide por un cambio de masa comparando la masa original respecto a la masa luego del calentamiento en el horno TFO. (Salazar, 2011, pág. 27)

- Viscosidad a 60 °C (ASTM D2171). Al residuo del envejecido TFO. (Horno de película delgado por sus siglas en ingles)

Este dato proporciona información preliminar del comportamiento del asfalto posterior a la etapa de envejecimiento TFO. Se mide la viscosidad del asfalto acondicionado TFO y se compara con el valor inicial de viscosidad absoluta del asfalto en condición original. De esta información se obtiene la razón de viscosidades. Es una forma muy cuantitativa de determinar el envejecimiento del asfalto después del

acondicionamiento TFO, para los asfaltos clasificados por grado de viscosidad se utiliza el valor de 3.0 máximo., como razón de viscosidades. (Salazar, 2011, pág. 27)

- Ductilidad a 25 °C (ASTM D113). Al residuo del envejecido TFO. (Horno de película delgada) por sus siglas en ingles

La presencia o ausencia de ductilidad es importante porque mide la capacidad del asfalto a la elongación antes de romperse, bajo condiciones controladas. Los asfaltos dúctiles tienen normalmente mejores propiedades aglomerantes. Por otra parte, asfaltos con una ductilidad muy elevada son usualmente susceptibles a los cambios de temperatura y por lo tanto a la deformación. (Salazar, 2011, pág. 27).

Tabla N°1. Especificaciones para cementos asfálticos clasificados por su viscosidad a 60 °C

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	MÉTODO ASTM	Grado de viscosidad					
			AC-25	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosidad, 60°C	N s/m ²	D-2170	250 ± 50	500 ± 100	1000 ± 200	2000 ± 400	3000 ± 600	4000 ± 800
Viscosidad, 135°C, mínimo	mm ² /s	D.2170	125	175	250	300	350	400
Penetración, 25°C, 100 g, 5 s, mínimo	1/10 mm	D-5	220	140	80	60	50	40
Punto de inflamación, Cleveland Copa Abierta, mínimo	°C	D-92	163	177	219	232	232	232
Solubilidad en tricloroetileno, mínimo	%	D-2042	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
<u>Pruebas sobre residuo del ensayo de horno sobre película delgada:</u>		D-1754						
Viscosidad, 60°C, máx.	N s/m ²	D-2171	1250	2500	5000	10000	15000	20000
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, mínimo	cm	D-113	100 ^A	100	75	50	40	25

Fuente: Salazar (2011)

- Por penetración

En el Perú se emplea el ensayo de penetración para clasificar los asfaltos. El uso del ensayo de penetración para caracterizar la consistencia del asfalto data desde finales siglo XIX. Ya que los ensayos de penetración y punto de ablandamiento son de origen empírico, es esencial que estos sean

llevados a cabo bajo exactamente las mismas condiciones. (Mendez, 2012, pág. 86)

La Tabla N° 2 muestra las especificaciones para cementos asfálticos clasificados por grado de penetración a 25 °C

La cantidad de muestra necesaria para la realización de las pruebas es un galón (3.78 litros) de asfalto. Adicionalmente se recomienda tener una muestra adicional del mismo asfalto para utilizarlo como testigo. El principio fundamental es clasificar el asfalto de acuerdo con los resultados del ensayo de penetración a 25 °C. Se debe verificar el cumplimiento de los de más parámetros especificados. (Salazar, 2011, pág. 28)

Los ensayos especificados son:

Breve descripción del fundamento de las pruebas de ensayo, La mayoría de los ensayos fueron descritos en la clasificación por grado de viscosidad.

- Penetración a 25 °C (ASTM D 5).
- Punto de inflamación con copa abierta Cleveland (ASTM D92).
- Ductilidad a 25 °C (ASTM D113).
- Solubilidad en tricloroetileno (ASTM D70).
- Cambio de masa en horno de película delgada TFO (ASTM D1754).
- Penetración a 25 °C (ASTM D 5). Al residuo del envejecido TFO.

Este dato proporciona una estimación del comportamiento del asfalto posterior a la etapa de envejecimiento TFO, se mide la penetración a 25 °C del asfalto acondicionado TFO y se compara con el valor inicial de penetración a 25 °C del asfalto en condición original. De esta forma se obtiene información cuantitativa del envejecimiento del asfalto después del acondicionamiento en el horno TFO. (Salazar, 2011, pág. 28)

- Ductilidad a 25 °C (ASTM D113). Al residuo del envejecido TFO.

Tabla N°2. Especificaciones para cementos asfálticos. Clasificados por su grado de penetración

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	MÉTODO ASTM	GRADO DE PENETRACIÓN									
			40-50		60-70		85-100		120-150		200-300	
			Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Penetración, 25°C, 100 g, 5 s	---	D-5	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Punto de inflamación, Cleveland Copa Abierta	°C	D-92	232	---	232	---	232	---	218	---	177	---
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min	cm	D-113	100	---	100	---	100	---	100	---	100 ^A	---
Solubilidad en tricloroetileno	%	D-2042	99.0	---	99.0	---	99.0	---	99.0	---	99.0	---
Penetración retenida después de la prueba de horno sobre película delgada	%	D-5 Después de realizar D-1754	55+	---	52+	---	47+	---	42+	---	37+	---
Ductilidad 25°C, 5 cm/min, después de prueba de horno sobre película delgada	cm	D-113 Después de realizar D-1754	---	---	50	---	75	---	100	---	100 ^A	---

Fuente: Salazar (2011)

- Equivalencias entre grado de viscosidad y grado de penetración. Debido a la posibilidad de utilizar la clasificación de grado de viscosidad a 60 °C o la de penetración a 25 °C, es importante conocer la equivalencia para estas dos formas de clasificar el asfalto destinado para la construcción de pavimentos. (Salazar, 2011, pág. 29).

Tabla N°3. Especificaciones para cementos asfálticos. Equivalencias entre grado de penetración y grado de viscosidad

Grado de Penetración	Grado de Viscosidad AC (Asphalt Cement)
40-50	AC-40
60-70	AC-20
85-100	AC-10
120-150	AC-5
200-300	AC-2.5

Fuente: Salazar (2011)

2.2.9 Polímeros

Los polímeros son 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 Figura N°4 (Montejo, 2002, pág. 621).

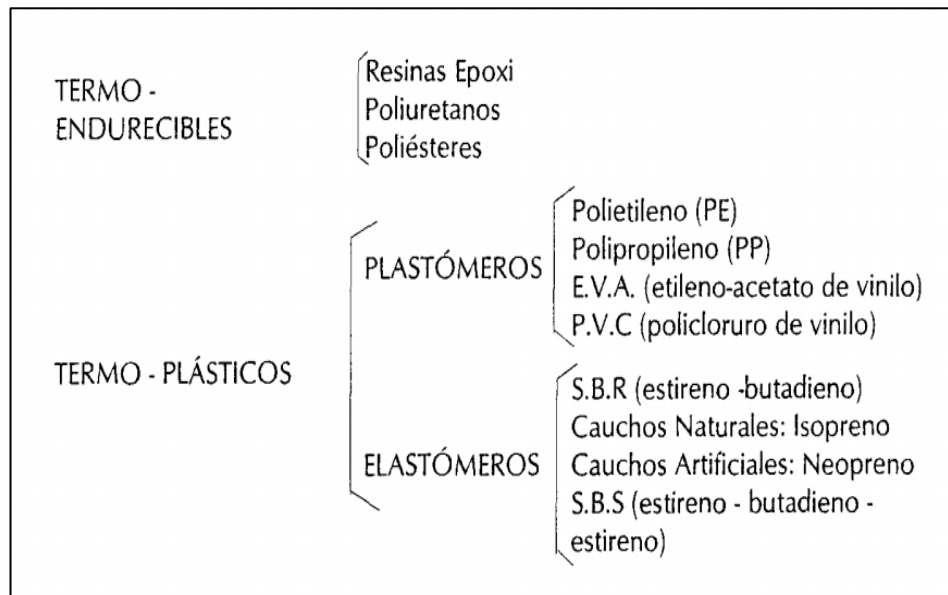


Figura N°5: Clasificación de polímeros

Fuente: Montejo (2002)

Los termo endurecibles, son polímeros formados por reacción química de dos componentes (base y endurecedor), dando lugar a una estructura entrecruzada, por lo que no pueden ser recuperados para volver a transformarse. (Montejo, 2002, pág. 621)

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: (Montejo, 2002, pág. 621)

2.2.10 Polímeros tipo 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 polimerizan 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.
- % 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.

2.2.11 Polímeros tipo elastómeros

Los elastómeros 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 acrílico.
- 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. El más incompatible, el Estireno (fase dura) con temperatura de cristalización: 100°C. Butadieno (fase elástica) con temperatura de cristalización menor que la ambiente.

Montejo (2002) indica 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: (pág. 623)

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

2.2.12 Agregados

Según el Asphalt Institute (1982) nos 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)

2.2.13 Graduación y tamaño máximo de partícula

Según el Asphalt Institute (1982) nos 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 debe ser determinado, debido a que las especificaciones hablan de un tamaño máximo de partículas para cada agregado usado. Existen dos formas de designar los tamaños máximos de las partículas:
 - **Tamaño máximo nominal de partícula:** Es 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:** es designado como un tamiz más grande que el tamaño máximo nominal de partícula. Típicamente, este es el tamiz más pequeño por el cual pasa el 100% de las partículas de agregado (p. 42).

2.2.14 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° 7 (Asphalt Institute, 1982, pp. 51-52).

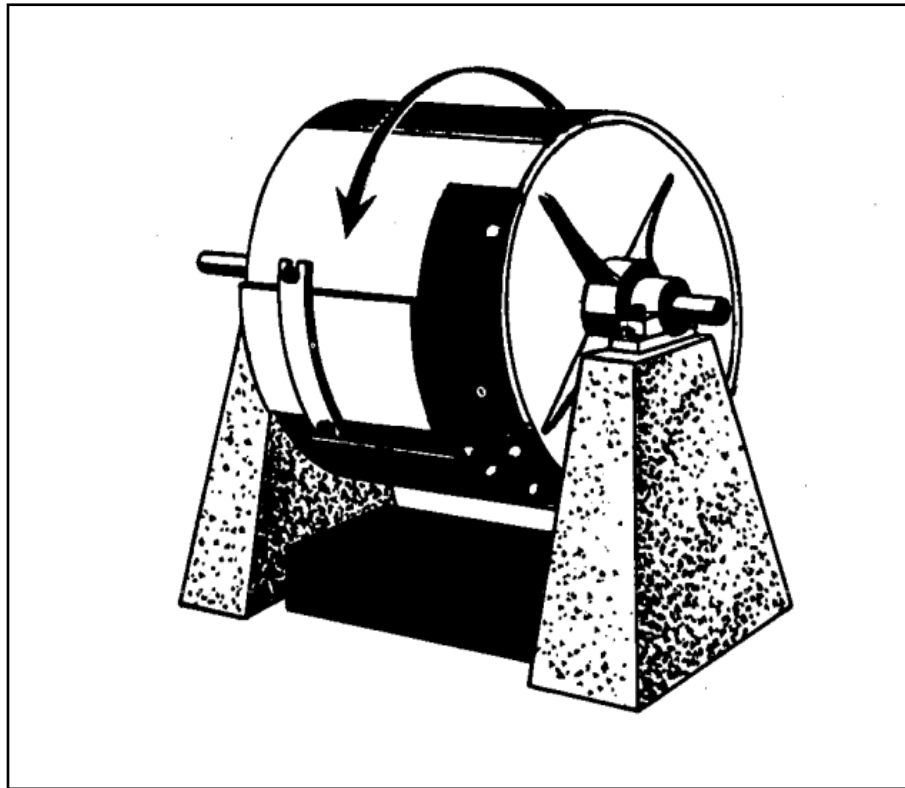


Figura N°6: Máquina de ensayo de Los Ángeles

Fuente: Asphalt Institute (1982)

2.2.15 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).

2.2.16 Forma del agregado

La forma de la partícula (Figura N° 7) 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).

2.2.17 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).

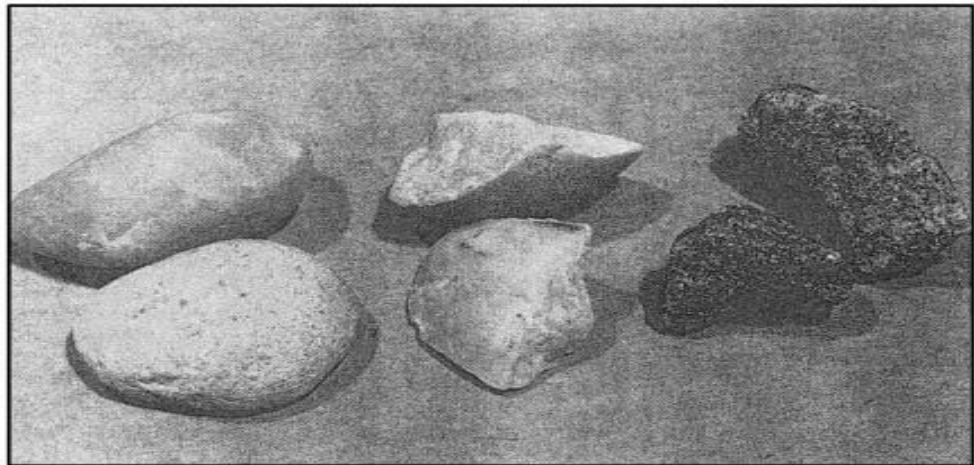


Figura N°7: Textura del Agregado

Fuente: Asphalt Institute (1982)

2.2.18 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).

2.2.19 Afinidad con 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 traqueanas 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).

2.2.20 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).

2.2.21 Ensayos para determinar las características y comportamiento de la mezcla asfáltica

Los ensayos que se realizan a las respectivas muestras de pavimentos para poder determinar el 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^3 o lb/ft^3 . La densidad es calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua ($1,000 \text{ kg/m}^3$ o 62.416 lb/ft^3). (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° 8 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)

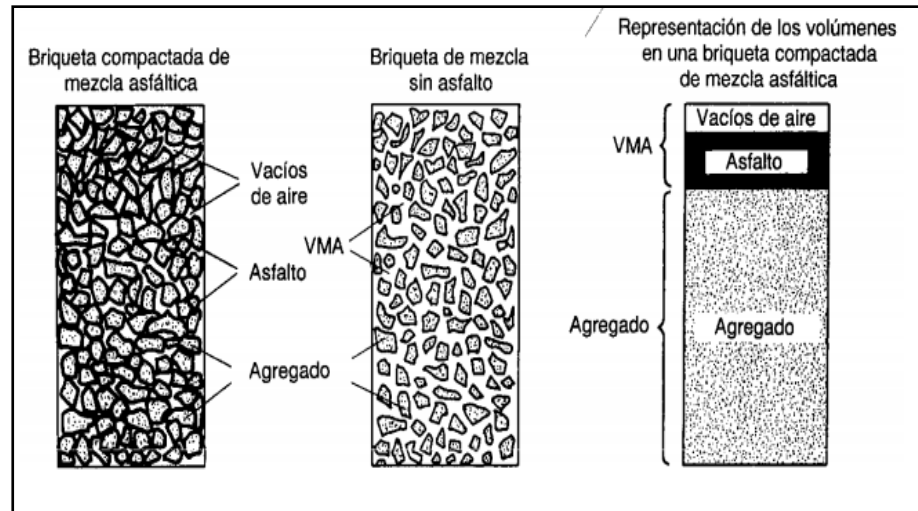


Figura N°8: Ilustración del VMA en una Probeta de Mezcla

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)

2.2.22 Propiedades consideradas en el diseño de mezcla por el método Marshall

Estas propiedades características ayudarán a definir la calidad del pavimento y se detallan a continuación:

- 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° 1 figura una lista de algunas de estas causas y efectos. (Asphalt Institute, 1982, p. 62)

Tabla N°4. 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° 2 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°5. 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 esta 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)

2.2.23 Ensayo Marshall

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

a) 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)

b) 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: 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.

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).

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.

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)

- c) 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.

Según el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013) nos muestra una tabla con valores mínimos de estabilidad y fluencia de la mezcla asfáltica:

Tabla N°6. Requisitos para mezcla de concreto bituminoso

Parámetro de Diseño	Clase de Mezcla		
	A	B	C
Marshall MTC E 504			
1. Compactación, número de golpes por lado	75	50	35
2. Estabilidad (mínimo)	8,15 KN	5,44 KN	4,53 KN
3. Flujo 0,01" (0,25 mm)	8-14	8-16	8-20
4. Porcentaje de vacíos con aire (1) (MTC E 505)	3-5	3-5	3-5
5. Vacíos en el agregado mineral	Tabla 423-10		
Inmersión - Compresión (MTC E 518)			
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	0,6-1,3
		-	
		1,3	
Relación Estabilidad/flujo (kg/cm)	1.700-4.000		
Resistencia conservada en la prueba de tracción indirecta AASHTO T 283		80	
		mí	
		n.	

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013)

2.2.24 Mezcla asfáltica modificada con polímeros

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

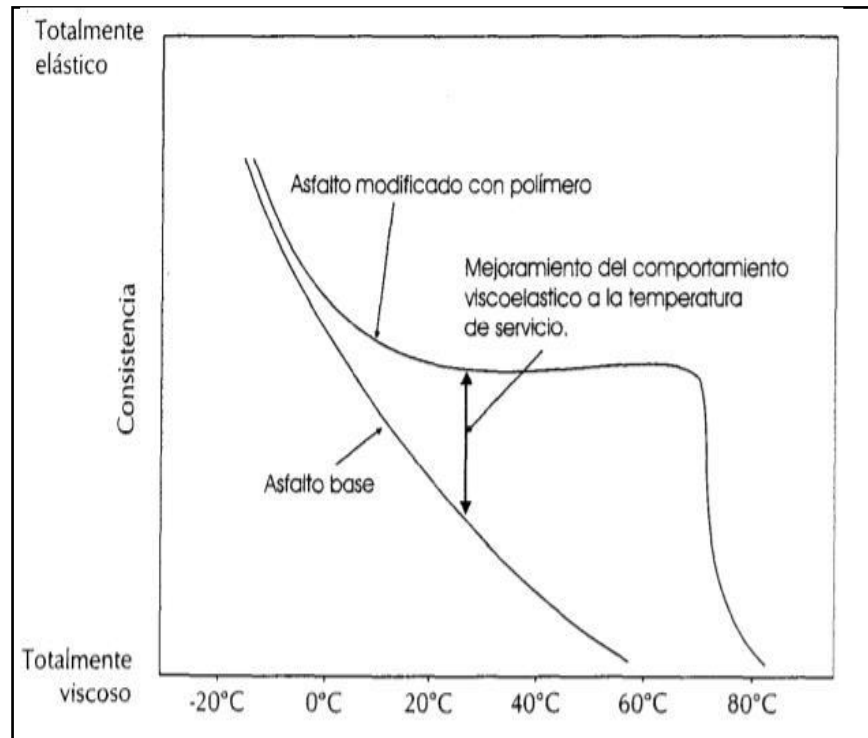


Figura N°9: Efecto de la incorporación de un polímero sobre la susceptibilidad térmica del asfalto
Fuente: Montejo (2002, p.618)

- Beneficios que se buscan al modificar el asfalto
Montejo (2002) muestra que:
Los principales beneficios que se persiguen con la modificación del asfalto son:
 - 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)
- Compatibilidad del polímero con el 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 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)
 - 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 (pp. 623-624)

Para Montejo (202), 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 prioridad, 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 utilizados:

- 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

Polímero	Resistencia a la deformación permanente	Adhesión a los agregados	Resistencia al envejecimiento	Incremento de costo
Termoendurecible	+++	+	+	Muy alto
Elastómeros	++	+	0	Medio alto
Plastómeros	1	0	0	Medio alto
Caucho de llanta usada	0/1	0	0	Medio

muy efectivo+++
 mejora sustancial++
 mejora significativa+
 poca o ninguna mejora 0

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

- Técnicas usadas para modificar asfaltos

Acosta & Herrera (2016) indica que:

Al momento de añadir un polímero al asfalto, las propiedades del asfalto modificado dependen de los siguientes parámetros:

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

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).

- Ensayos para determinar las 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 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 termo endurecible; 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)

• 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 compatibilidad 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)

- Proceso constructivo de la mezcla asfáltica modificada

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

Los equipos utilizados fueron similares a los usados en una mezcla convencional, no se utilizó el rodillo neumático, en cambio se utilizó un camión regador para aplicar el riego de liga, una máquina pavimentadora para colocar la carpeta asfáltica del espesor requerido y un rodillo 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 verificar el espesor de la carpeta y un operador del rodillo vibratorio.

La aplicación de la mezcla asfáltica modificada fue sobre un pavimento asfáltico, el proceso se describe a continuación:

- 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/m², 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.

- 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.

2.2.25 Ensayos de desempeño de la mezcla asfáltica

Los ensayos de desempeño en mezclas asfálticas son los siguientes:

- 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 transpirabilidad 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)



Figura N°10: Equipo de Wheel Tracking Teste

Fuente: Morea (2013)

- 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).

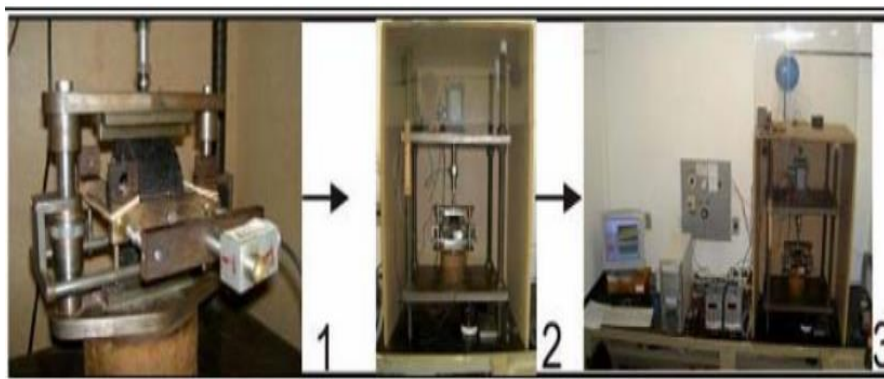


Figura N°11: Ensayo de Módulo de Resiliencia

Fuente: Escalante (2007)

- 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)

- 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)

- 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.

Donde:

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

Rt: Tracción Indirecta

P: Carga aplicada para compresión (Kg)

H: Espesor de briqueta (cm)

D: Diámetro de briqueta (cm)

2.2.26 Costos y Presupuestos

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 incluyen en forma indirecta como son los honorarios:

Haciendo una clasificación obtendremos:

- ✓ Costos Directos
- ✓ Costos Indirectos
 - 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.

CAPITULO III: SISTEMA DE HIPOTESIS

3.1 Hipótesis

3.1.1 Hipótesis General

La influencia de polímeros en mezclas asfálticas, optimiza la resistencia mecánica, desempeño y costos del pavimento flexible en zonas cálidas y frías del Perú.

3.1.2 Hipótesis Especificas

- a) Al comparar las propiedades del asfalto virgen y modificado con polímero SBS, se demostrará la optimización del asfalto virgen para su utilización en zonas cálidas y frías.
- b) Al comparar el desempeño, estabilidad y flujo de las mezclas asfáltica convencional y modificada con polímero SBS, se demostrará los beneficios de utilizar mezclas asfálticas modificadas con polímero SBS en zonas cálidas y frías.
- c) Determinado la rentabilidad a través de un análisis costo – beneficio de las mezclas asfálticas modificadas con polímeros, se optimiza los costos.

3.1.3 Definición conceptual de variables

- Variable independiente: Polímero SBS
Es un elastómero de tipo copolímero termoplástico sintético obtenido mediante la polimerización de una mezcla estireno butadieno. El poliestireno es un plástico duro y resistente que aporta durabilidad al SBS y el polibutadieno es material parecido al caucho que le da al SBS características similares del caucho. Este copolímero es aplicado en los asfaltos para modificar sus propiedades físico - mecánicas.
- Variable dependiente: Propiedades de la mezcla asfáltica
Una mezcla asfáltica en general es una combinación de un tipo de ligante y agregados minerales pétreos. Las proporciones relativas de estos minerales determinan las propiedades físicas de la mezcla, así como su desempeño. Las mezclas asfálticas se emplean en la construcción de pavimentos flexibles ya sea en capas de rodadura o en capas inferiores y

su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda segura y económica.

CAPITULO IV: METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

4.1 Tipo y Metodología de la Investigación

4.1.1 Método de Investigación

El método de estudio es deductivo, ya que evaluará las características de las distintas investigaciones realizadas en zonas cálidas y frías del Perú.

4.1.2 Diseño de investigación

El diseño de investigación será no experimental ya que se basará en la información recolectada de trabajos de investigación realizados en las distintas zonas de estudio

4.1.3 Enfoque de investigación

El enfoque de investigación es cualitativo ya que inferiremos conclusiones en base a los datos revisados en los trabajos de investigación.

4.1.4 Fuente de información

Nuestra fuente de información es retro-lectiva, ya que recurriremos a fuentes de información existentes.

4.1.5 Tipo de investigación

El tipo de investigación es descriptiva ya que mediremos las características de los trabajos de investigación

4.1.6 Diseño de la investigación

- Según propósito del estudio es observacional, ya que no se intervendrá sobre los resultados, los cuales reflejarán la evolución natural de los eventos, ajena a nuestra voluntad.
- Según número de mediciones es transversal. La variable de estudio es medida en una sola ocasión y el tiempo que ello tome es indiferente.
- Según cronología de las observaciones es retrospectivo. Se redactará la información obtenida a partir de mediciones en las que no se ha tenido participación.

4.1.7 Estudio del diseño

Estudio observacional ya que no nos será posible manejar la variable independiente.

4.1.8 Población de estudio

La estará constituida por investigaciones sobre el uso de polímeros SBS en pavimentos flexibles para climas cálidos y fríos.

4.2 Relación entre variables

4.2.1 Identificación de variables

Variable Independiente: Polímero SBS

Variable Dependiente: Propiedades de la mezcla asfáltica

4.3 Técnica e instrumentos de recolección de datos

La recolección de datos se hizo por medio de investigaciones existentes en zonas cálidas y frías (diseños de mezclas asfálticas, ensayos al cemento asfáltico de petróleo, ensayos de estabilidad, flujo y desempeño).

4.3.1 Fuentes

4.3.2 Procedimiento para la recolección de datos

- Se eligieron los trabajos de investigación que se realizaron en zonas cálidas y frías
- Se eligió dos trabajos de investigaciones que realización al CAP PEN 60/70 y CAP PEN 120/150.
- Se hizo un cuadro comparativo entre el asfalto virgen y el asfalto modificado de los ensayos que se realiza a ambos grados del Cemento Asfáltico de Petróleo PEN 60/70 Y PEN 120/150.
- Se escogieron los resultados de estabilidad y flujo de las mezclas asfálticas convencionales para compararlo con las mezclas asfálticas modificadas con polímero SBS en distintos trabajos de investigación, para el CAP PEN 60/70 y CAP PEN 85/100
- Se escogieron los resultados del desempeño de las mezclas asfálticas convencionales para compararlo con las mezclas asfálticas modificadas con polímero SBS en distintos trabajos de investigación, para el CAP PEN 60/70 y CAP PEN 85/100.
- Se recopiló información de presupuestos elaborados en las investigaciones recopiladas.

4.3.3 Técnicas de procesamiento y análisis de datos

- Se consideró zonas cálidas donde la temperatura media anual del aire es mayor o igual a 24°C y frías donde la temperatura media anual del aire es menor o igual a 7°C.
- Se realizó un cuadro comparativo con los resultados de las investigaciones (Ensayos a los asfaltos, Estabilidad y flujo, Ensayos de Desempeño y Análisis Comparativo Costo – Beneficio).

CAPITULO V: PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACION

5.1 Resultados y Análisis comparativo entre el asfalto convencional y asfalto modificado con polímero Tipo SBS

5.1.1 Resultados de los ensayos para Cementos asfálticos Convencionales y Modificados AC – 20 (PEN 60/70)

Tabla N°8. Ensayos para Cementos asfálticos Convencionales y Modificados AC-20 (PEN 60/70)

ENSAYO	METODO	% de polimero	RESULTADOS	UNIDAD	ESPECIFICACIONES ASTM	
					Mín	Máx
Penetracion a 25°C, 100g, 5s, 0.1mm	ASTM D5	0	67	dmm	60	-
		2.00%	60			
		3.00%	53			
		4.00%	42			
Punto de Ablandamiento	ASTM D36	0	49	°C	40°C	-
		2.00%	63.1			
		2.50%	65.65			
		3.00%	69.9			
Recuperacion Elastica	ASTM D6084	0	12.5	%	60	-
		2.00%	57.5			
		3.00%	62.5			
		4.00%	67.5			
Ductilidad	ASTM D113	0	149	cm	100	-
		2.00%	27			
		3.00%	26			
		4.00%	24			
Punto de Inflamacion	ASTM D92	0.00%	269	°C	232	-
		2.00%	289			
		3.00%	291			
Película Delgada en Horno Rotatorio						
Penetracion a 25°C, 100g, 5s, 0.1mm	ASTM D5	2% original	60	dmm	52	-
		2% envejecido	43			
Ductilidad	ASTM D113	2% original	27	cm	50	-
		2% envejecido	18			
Perdida por Calentamiento	-	2% original	-0.02%	%	-	0.8
		2% envejecido	-0.03%			

Fuente: Elaboración propia

5.1.2 Resultados de los ensayos para Cementos Asfálticos Convencionales y Modificados PEN 120/150

Tabla N°9. Resultados de los ensayos para cementos asfálticos convencionales y modificados PEN 120/150

ENSAYO	METODO	% de polimero	RESULTADOS	unidad	ESPECIFICACIONES ASTM	
					Mín	Máx
Penetracion a 25°C, 100g, 5s, 0.1mm	ASTM D5	0	121	dmm	120	150
		2.00%	97			
		2.50%	90			
		3.00%	78			
		4.00%	78			
Punto de Ablandamiento	ASTM D36	0	46	°C	40°C	-
		2.00%	52			
		2.50%	60			
		3.00%	59			
		4.00%	66			
Recuperacion Elastica	ASTM D6084	0	8	%	60%	-
		2.00%	60			
		2.50%	75			
		3.00%	80			
		4.00%	90			
Recuperacion Elastica por Torsion	ASTM D518	0	0	%	60%	-
		2.00%	50			
		2.50%	64			
		3.00%	75			
		4.00%	80			
Ductilidad	ASTM D518	0	104	cm	100	-
		2.00%	42			
		2.50%	41			
		3.00%	-			
		4.00%	-			

Fuente: Elaboración propia

5.1.3 Análisis comparativo del Asfalto virgen y asfalto modificado con polímero SBS

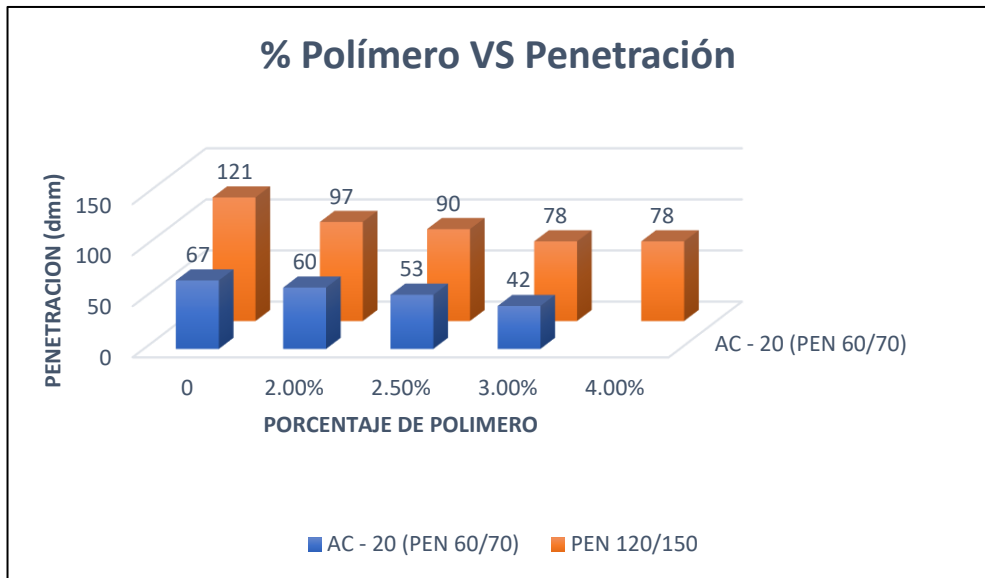


Figura N°12: Porcentaje de Polímero vs Penetración

Fuente: Elaboración propia

En la figura 12 se observa que para ambos asfaltos AC – 20 (PEN 60/70), mientras aumenta el porcentaje de polímero, el asfalto se vuelve más viscoso, así reduciendo la penetración. En otras palabras, vale decir que el asfalto es inversamente proporcional al contenido de polímero.

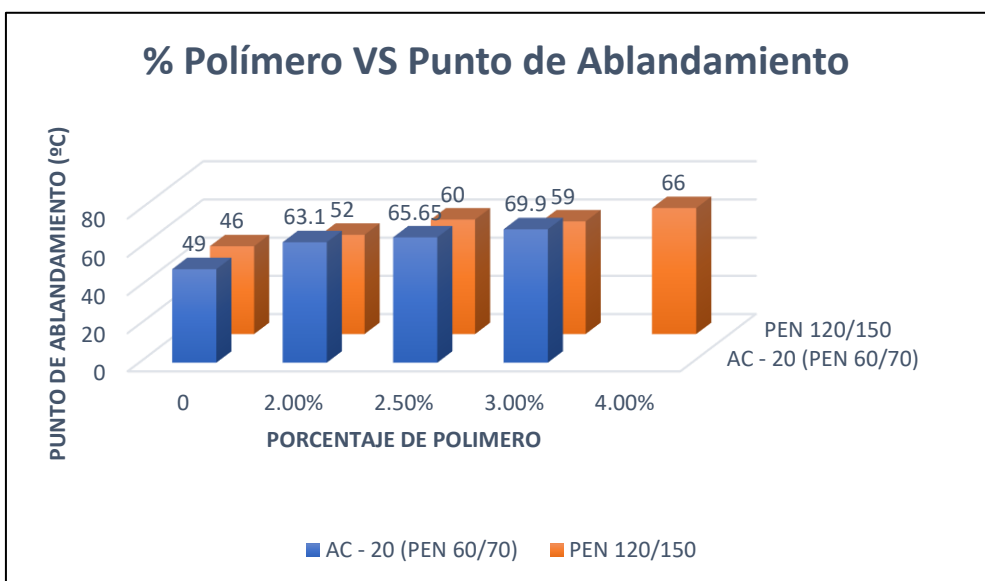


Figura N°13: Porcentaje de polímero vs Punto de Ablandamiento

Fuente: Elaboración propia

En la figura 13 se observa para ambos asfaltos que, mientras más aumenta el contenido de polímero, el punto de ablandamiento aumenta, vale decir son directamente proporcionales.

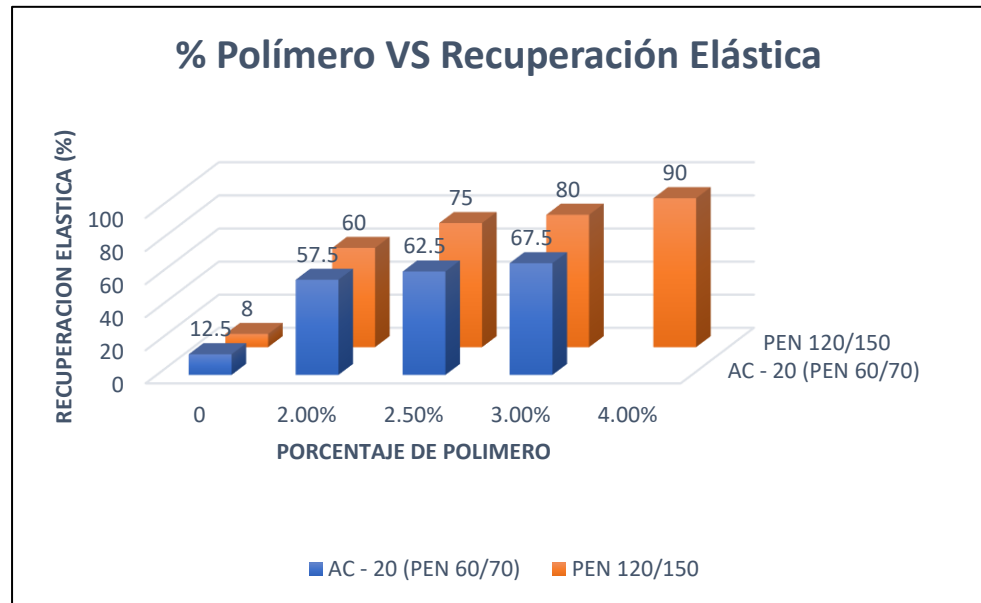


Figura N°14: Porcentaje de polímero vs recuperación elástica

Fuente: Elaboración propia

En la figura 14 se observa para ambos asfaltos que, mientras más contenido de polímero, la recuperación elástica del asfalto será mayor, obteniendo un máximo del 90% para el PEN 120/150 y 67.5% para el AC – 20 (PEN 60/70). Lo cual es muy beneficioso a comparación de utilizar un asfalto convencional.

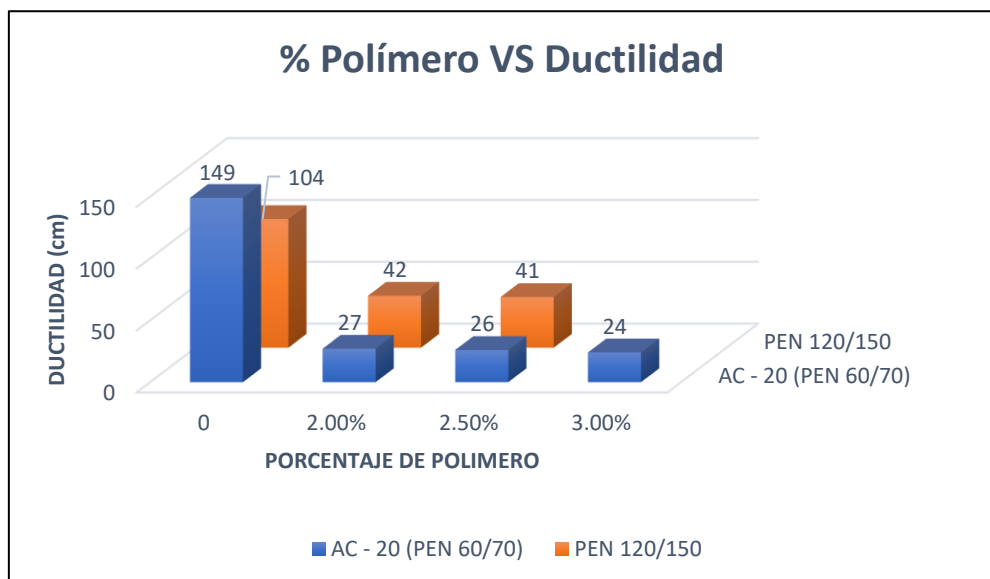


Figura N°15: Porcentaje de polímero vs Ductilidad

Fuente: Elaboración propia

En la figura 15 se observa para ambos asfaltos que, mientras se incrementa el porcentaje de polímero, va reduciendo la ductilidad del asfalto de forma que se vuelve más viscoso y por ende más frágil.

5.1.4 Ensayos de desempeño de mezclas asfálticas

Item Nº	Investigación	País	Universidad	Cemento Asfáltico Base	Mezclas	ENSAYOS DE DESEMPEÑO				
						Hamburgo Wheel Traking			Vida Fatiga	Modulo Resiliencia
						Nº Pasadas Programadas	Nº Pasadas Recibidas	Ahuellamiento Producido	Nº de Ciclos Recibidos	
1	"ESTUDIO Y ANALISIS DE DESEMPEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL PEN 85/100 Plus Y MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON POLIMERO TIPO SBS PG 70 -28"	Peru	UAC	PEN 85/100 PLUS	MAC	20000	15631	12.500	186223	---
					MAMP (SBS)	20000	20000	3.790	3244490	---
2	"ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON POLÍMEROS SBS BETUTEC IC Y UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL 60/70"	Peru	UPN	PEN 60/70	MAC	20000	20000	7.77	---	---
					MAMP (SBS)	20000	20000	1.8	---	---
3	"EVALUACION DE MEZCLAS PRODUCIDAS CON LIGANTES ASFÁLTICOS PERUANOS CONVENCIONAL PEN 60/70 Y MODIFICADO POR POLIMERO SBS TIPO I 60/60 Y PG 76-22"	BRASIL	UNIVERSIDAD DE SAO PAULO	PEN 60/70	MAC				15894	21770.9
					MAMP (SBS)				49588	23810.37
4	"COMPARACION DEL MODULO DE RIGIDEZ POR TENSION INDIRECTA UTILIZANDO EL METODO MARSHALL Y METODO SUPERPAVE DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON POLIMEROS SBS"	ECUADOR	UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR	AC-20 EQUIVALE A UN PEN 60/70	MAC					36087.76
					MAMP (SBS)					59785.96

Tabla Nº10. Ensayos de desempeño de mezclas asfálticas

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 11 se observa, para el ensayo Wheel tracking, la mezcla asfáltica convencional PEN 85/100 Plus no llega a atender el requerimiento de un ahuellamiento menor a 12.50 mm a las 20 000 pasadas, presentando una profundidad de ahuellamiento mayor a 12.50 mm a los 15 631 ciclos en promedio de las dos pruebas realizadas, sin embargo la mezcla asfáltica modificada con polímero SBS PG 70 -28 sí cumple con el requerimiento de un ahuellamiento menor a 12.50 mm a las 20 000 pasadas, presentando una profundidad de ahuellamiento de 3.79mm en promedio para las dos pruebas realizadas. Esto nos muestra la gran diferencia en términos de resistencia a la deformación permanente que presentan los asfaltos modificados con polímero

SBS PG 70 -28 siendo estos muy superiores a la de un asfalto convencional PEN 85/100 Plus.

Para el ensayo vida fatiga, se observa en la tabla N° 11 que la mezcla asfáltica convencional PEN 85/100 Plus soportó en promedio 186 223 aplicaciones de carga antes de llegar a tener una pérdida de rigidez mayor al 50% de su rigidez inicial, sin embargo, la mezcla asfáltica modificada con polímero SBS PG 70 -28 soporto en promedio 3 244 490 aplicaciones de carga con una pérdida de rigidez aún menor al 50% de su rigidez inicial. Estos resultados muestran la extraordinaria resistencia a la fatiga que presentan los asfaltos modificados con polímero en comparación a los asfaltos convencionales, que, para este caso en específico, fue 17 veces mayor y en el siguiente caso se obtuvo un valor tres veces mayor al que de la mezcla asfáltica convencional.

Los resultados en el ensayo módulo de resiliencia que se observa en la tabla 11, la mezcla asfáltica convencional y a la mezcla asfáltica modificada con polímero SBS, indica que la mezcla modificada con polímero SBS proporciona un mayor módulo de resiliencia, es decir, una mejor resistencia a las cargas cíclicas. 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.

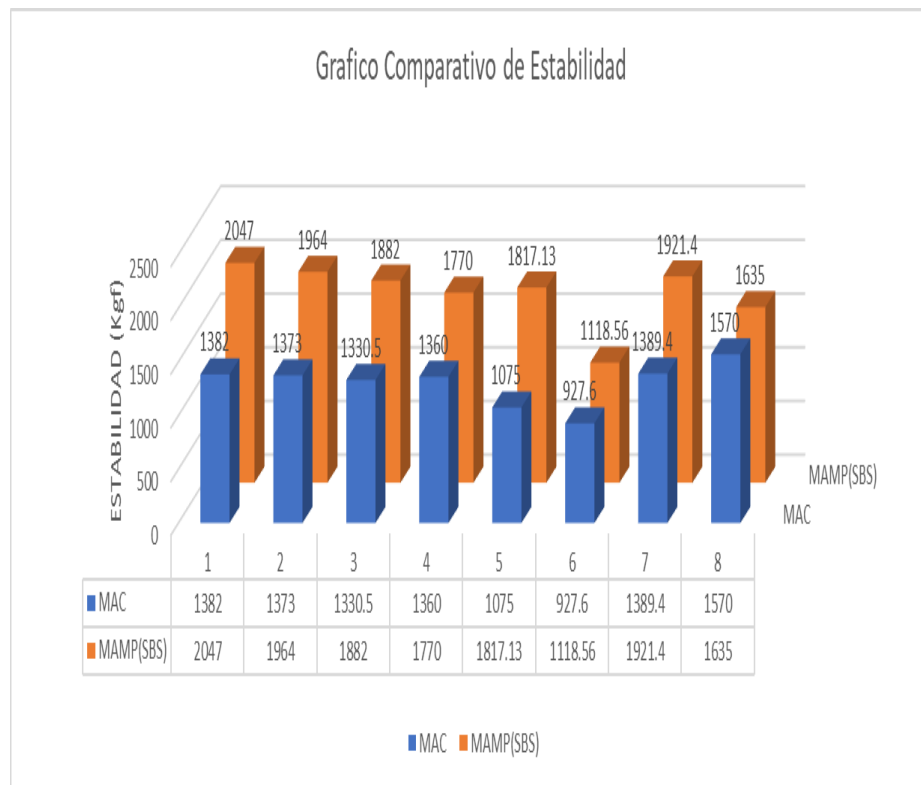
5.1.5 Estabilidad y flujo

Tabla N°11. Tabla comparativa de resultados del Ensayo Marshall

N°	Investigación	País	Universidad	Cemento Asfáltico Base	Mezcla	% Asfalto Óptimo	% de polímero	Ensayo Marshall	
								Estabilidad (Kgf)	Flujo (mm)
1	"ESTUDIO Y ANALISIS DE DESEMPEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL PEN 85/100 Plus Y MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON POLIMERO TIPO SBS PG 70 -28"	Peru	UAC	PEN 85/100 PLUS	MAC	6.30%		1382	14
					MAMP (SBS)	6.20%		2047	14.1
2	"ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON POLÍMEROS SBS BETUTECA Y UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL 60/70"	Peru	UPN	PEN 60/70	MAC	5.40%		1373	3.5
					MAMP (SBS)	5.30%		1964	3.3
3	"COMPORTAMIENTO DE LAS PROPIEDADES DE LA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON EL USO DE POLIMERO SBS EN LA AVENIDA CESAR CANEVARO, SAN JUAN DE MIRAFLORES, LIMA - 2019"	Peru	UCV		MAC			1330.5	14
					MAMP (SBS)		5.00%	1882	13.3
					MAMP (SBS)		6.00%	2114	14.3
4	"ESTUDIO COMPARATIVO DEL METODO CONVENCIONAL Y USO DE LOS POLÍMEROS EVA Y SBS EN LA APLICACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS"	Peru	USS	PEN 60/70	MAC			1360	3.33
					MAMP (SBS)		3.50%	1770	3.42
5	"EVALUACION DE LA ESTABILIDAD DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE UTILIZANDO ADITIVO SBS, TRUJILLO - LA LIBERTAD"	PERU	UCV	PEN 60/70	MAC			1075.8	3.5
					MAMP (SBS)		4.95%	1817.13	3.6
6	"CARACTERIZACION DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE, ELABORADAS CON EL USO DE CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO CON POLIMERO SBR Y SBS"	ECUADOR	UNIVERSIDAD CENTRAL DE ECUADOR	AC-20 EQUIVALE A UN PEN 60/70	MAC			927.6	3.5
					MAMP (SBS)		2.00%	1118.56	3.6
7	"ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE INCORPORANDO POLÍMEROS SBS EN LA AVENIDA UNIVERSITARIA CUADRA 53 A 57-COMAS-LIMA-PERU"	PERU	UCV	PEN 60/70	MAC	5.60%		1389.4	3.7
					MAMP (SBS)		5.00%	1921.4	3.6
8	"COMPARACION DEL MODULO DE RIGIDEZ POR TENSION INDIRECTA UTILIZANDO EL METODO MARSHALL Y METODO SUPERPAVE DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON POLÍMEROS SBS"	ECUADOR	UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR	AC-20 EQUIVALE A UN PEN 60/70	MAC	5.50%		1570	2.79
					MAMP (SBS)		2.50%	1670	3.05

Fuente: Elaboración propia

Figura N°16: Gráfico comparativo de las mezclas asfálticas convencionales y adicionadas con polímero SBS



Fuente: Elaboración propia

Tabla N°12. Porcentaje de incremento en la Estabilidad (MAMP SBS)

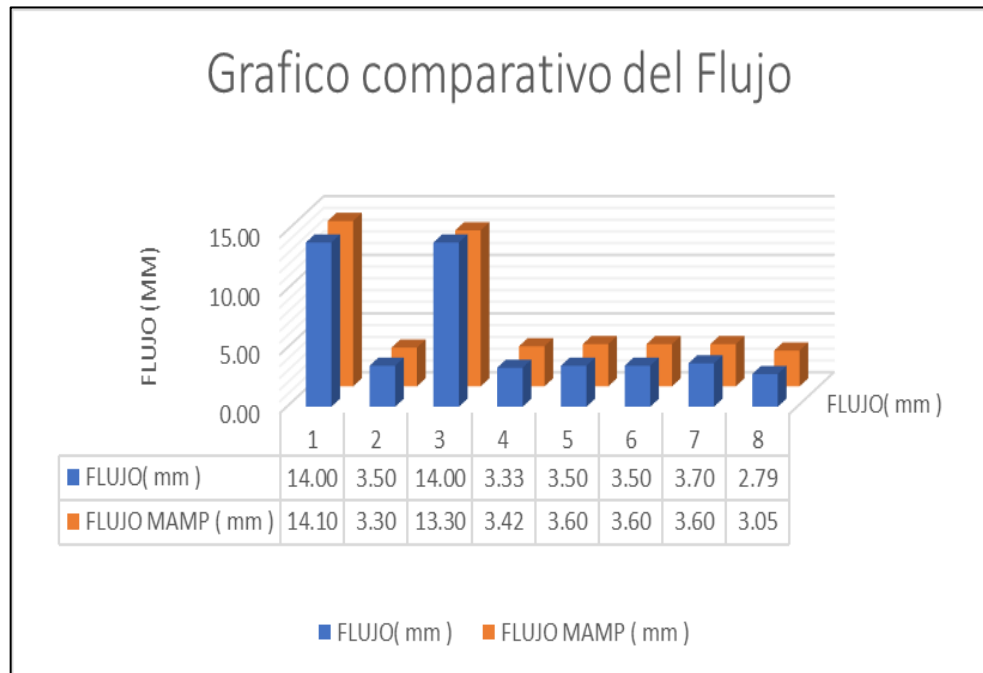
Tesis N°	% Incremento de Estabilidad(MAMP SBS)
1	48.12%
2	43.04%
3	41.45%
4	30.15%
5	69.04%
6	20.59%
7	38.29%
8	23.25%

Fuente: Elaboración propia

En la figura N°16 se puede apreciar que al modificar las mezclas asfálticas con polímeros se incrementa notablemente los valores de estabilidad; y corroborando con la tabla N°12 se evidencia un incremento en el rango del 20

a 70%, lo cual es un indicador positivo debido que el valor de estabilidad está ligado directamente con la carga máxima que puede soportar la mezcla asfáltica antes de que falle.

Figura N°17: Gráfico comparativo del flujo en mezclas asfálticas convencionales y mezclas asfálticas modificadas



Fuente: Elaboración propia

En la figura N°17 se muestra el comparativo del flujo para una mezcla asfáltica convencional y una mezcla asfáltica modificada con polímero SBS, del cual se observa que el flujo tiende a disminuir cuando se le agrega el polímero, esto es un indicador importante ya que la disminución del flujo en la mezcla asfáltica se ve evidenciada en su resistencia.

5.2 Análisis comparativo Costo – Beneficio de las mezclas asfálticas

Tabla N°13. Análisis de costos del pavimento asfáltico convencional por m²

Rendimiento: 9842.52 m²/día

DENOMINACION	UNIDAD	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO	SUB-TOTAL
MANO DE OBRA					0.13
CAPATAZ	HH	1	0.0008128	22.11	0.02
OFICIAL	HH	2	0.0016256	16.51	0.03
OPERARIO	HH	2	0.0016256	20.1	0.03
PEON	HH	4	0.0032512	14.85	0.05
HERRAMIENTAS					0.01
HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5		0.01
MATERIALES					10.66
ARENA GRUESA	m ³		0.119	42.32	5.04
CEMENTOS ASFALTICO PEN 60/70	gl		0.12	9.8	1.18
FILLER (CAL)	kg		1.12	1.1	1.23
PETROLEO DIESEL	gl		0.08	14.5	1.16
PIEDRA CHANCADA 3/4" - 1/2"	m ³		0.04	51.3	2.05
EQUIPOS					1.16
CARGADOR FRONTAL 125-155 HP 3YDS.3	HM	1	0.0008128	110	0.09
GRUPO ELECTROGENO 116 HP 75KW	KWH	2	0.0016256	250	0.41
PLANTA ASFALTICA EN CALIENTE 60-115 tn/h	HM	1	0.0008128	800	0.65
SECADOR DE ARIDOS	HM	1	0.0008128	13.34	0.01
COSTO DIRECTO /m²					11.95

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°14. Costo colocación en obra de pavimento asfáltico convencional

Tabla N°15.

Rendimiento: 9842.52 m²/día

DENOMINACION	UNIDAD	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO	SUB-TOTAL
MANO DE OBRA					0.11
CAPATAZ	HH	1	0.0008128	22.11	0.02
OPERARIO	HH	1	0.0008128	20.1	0.02
PEON	HH	6	0.0048768	14.85	0.07
HERRAMIENTAS					0.01
HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5	0.1032	0.01
EQUIPOS					0.8
CAMION VOLQUETE 15 M3	HM	5	0.004064	120	0.49
RODILLO NEUMATICO AUTOPROPULSADO 135HP 9- 26 ton	KWH	1	0.0008128	120	0.1
RODILLO TANDEM VIBRATORIO AUTOPROPULSADO 130 HP 9- 11 ton	HM	1	0.0008128	120	0.1
PAVIMENTADORA SOBRE LLANTAS 105 HP 10-16'	HM	1	0.0008128	150	0.12
SUB PARTIDA					15.41
ELABORACION DE MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE	m3		1.3	11.95	15.41
					16.33

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°16. Análisis del costo del pavimento convencional por m3

Rendimiento

500 m3/día

DENOMINACION	UNIDAD	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO	SUB-TOTAL
MANO DE OBRA					2.48
CAPATAZ	HH	1	0.016	22.11	0.35
OFICIAL	HH	2	0.032	16.51	0.53
OPERARIO	HH	2	0.032	20.1	0.64
PEON	HH	4	0.064	14.85	0.95
HERRAMIENTAS					0.12
HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5%	2.4757	0.12
MATERIALES					212.82
ARENA GRUESA	m3		2.349	42.32	99.41
CEMENTOS ASFALTICO PEN 60/70	gl		2.33	9.8	22.83
FILLER (CAL)	kg		22	1.1	24.20
PETROLEO DIESEL	gl		1.5	14.5	21.75
PIEDRA CHANCADA 3/4" - 1/2"	m3		0.87	51.3	44.63
EQUIPOS					22.77
CARGADOR FRONTAL 125-155 HP 3YDS.3	HM	1	0.016	110	1.76
GRUPO ELECTROGENO 116 HP 75KW	KWH	2	0.032	250	8.00
PLANTA ASFALTICA EN CALIENTE 60-115 tn/h	HM	1	0.016	800	12.80
SECADOR DE ARIDOS	HM	1	0.016	13.34	0.21
COSTO DIRECTO /m2					238.20

Fuente: Elaboración Propia

Son trescientos nueve con 66/100 Soles por m3 de pavimento

Tabla N°17. Análisis del costo de colocación en obra del pavimento asfáltico convencional

Rendimiento

500 m3/día

e= 2"

DENOMINACION	UNIDAD	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO	SUB-TOTAL
MANO DE OBRA					2.10
CAPATAZ	HH	1	0.016	22.11	0.35
OPERARIO	HH	1	0.016	20.1	0.32
PEON	HH	6	0.096	14.85	1.43
HERRAMIENTAS					0.11
HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5%	2.10	0.11
EQUIPOS					15.84
CAMION VOLQUETE 15 M3	HM	5	0.08	120	9.60
RODILLO NEUMATICO AUTOPROPULSADO 135HP 9- 26 ton	KWH	1	0.016	120	1.92
RODILLO TANDEM VIBRATORIO AUTOPROPULSADO 130 HP 9- 11 ton	HM	1	0.016	120	1.92
PAVIMENTADORA SOBRE LLANTAS 105 HP 10-16'	HM	1	0.016	150	2.40
SUB PARTIDA					309.66
ELABORACION DE MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE	m3		1.3	238.20	309.66
COSTO DIRECTO /m3					327.70

Tabla N°18. Análisis de costo del pavimento con polímero SBS por m2

Rendimiento: 1574.8 m2/dia

DENOMINACION	UNIDAD	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO	SUB-TOTAL
MANO DE OBRA					0.79
CAPATAZ	HH	1	0.0051	22.11	0.11
OFICIAL	HH	2	0.0102	16.51	0.17
OPERARIO	HH	2	0.0102	20.1	0.20
PEON	HH	4	0.0203	14.85	0.30
HERRAMIENTAS					0.04
HERRAMIENTAS MANUALES	%		5%	0.79	0.04
MATERIALES					14.82
ARENA GRUESA	m3		0.1190	42.32	5.04
CEMENTOS ASFALTICO PEN 60/70	gl		0.1200	9.8	1.18
FILLER (CAL)	kg		1.1200	1.1	1.23
PETROLEO DIESEL	gl		0.0800	14.5	1.16
POLIMERO SBS	Kg		0.2600	16	4.16
PIEDRA CHANCADA 3/4" - 1/2"	m3		0.0400	51.3	2.05
EQUIPOS					15.31
CARGADOR FRONTAL 125-155 HP 3YDS.3	HM	1	0.0051	110	0.56
GRUPO ELECTROGENO 116 HP 75KW	KWH	3	0.0152	250	3.81
PLANTA ASFALTICA EN CALIENTE 60-115 tn/h	HM	1	0.0051	800	4.06
SECADOR DE ARIDOS	HM	1	0.0051	13.34	0.07
AGITADOR PARA TANQUE DE ASFALTO	HM	2	0.0102	20	0.20
INVERTERS BOMBA ASFALTO	HM	2	0.0102	350	3.56
MOLINO COLOIDAL CHP-240	HM	1	0.0051	600	3.05
COSTO DIRECTO /m2					30.95

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°19. Análisis del costo del pavimento asfáltico modificado colocado en obra

Rendimiento:

1574.8 m²/día

DENOMINACION	UNIDAD	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO	SUB-TOTAL
MANO DE OBRA					0.67
CAPATAZ	HH	1	0.0051	22.11	0.11
OPERARIO	HH	1	0.0051	20.1	0.10
PEON	HH	6	0.0305	14.85	0.45
HERRAMIENTAS					0.03
HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5%	0.67	0.03
EQUIPOS					5.03
CAMION VOLQUETE 15 M3	HM	5	0.0254	120	3.05
RODILLO NEUMATICO AUTOPROPULSADO 135HP 9- 26 ton	KWH	1	0.0051	120	0.61
RODILLO TANDEM VIBRATORIO AUTOPROPULSADO 130 HP 9- 11 ton	HM	1	0.0051	120	0.61
PAVIMENTADORA SOBRE LLANTAS 105 HP 10-16'	HM	1	0.0051	150	0.76
SUB PARTIDA					40.23
ELABORACION DE MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE	m3		1.3000	30.9492	40.23
COSTO DIRECTO /m²					45.96

5.2.1 Análisis de costos del pavimento con polímero SBS por m3

Rendimiento 80 m3/día

Rendimiento 80 m3/día

DENOMINACION	UNIDAD	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO	SUB-TOTAL
MANO DE OBRA					15.47
CAPATAZ	HH	1	0.10	22.11	2.21
OFICIAL	HH	2	0.20	16.51	3.30
OPERARIO	HH	2	0.20	20.1	4.02
PEON	HH	4	0.40	14.85	5.94
HERRAMIENTAS					0.77
HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5%	15.47	0.77
MATERIALES					294.37
ARENA GRUESA	m3		2.35	42.32	99.41
CEMENTOS ASFALTICO PEN 60/70	gl		2.33	9.8	22.83
FILLER (CAL)	kg		22.00	1.1	24.20
PETROLEO DIESEL	gl		1.50	14.5	21.75
POLIMERO SBS	Kg		5.10	16	81.60
PIEDRA CHANCADA 3/4" - 1/2"	m3		0.87	51.3	44.58
EQUIPOS					301.33
CARGADOR FRONTAL 125-155 HP 3YDS.3	HM	1	0.10	110	11.00
GRUPO ELECTROGENO 116 HP 75KW	KWH	3	0.30	250	75.00
PLANTA ASFALTICA EN CALIENTE 60-115 tn/h	HM	1	0.10	800	80.00
SECADOR DE ARIDOS	HM	1	0.10	13.34	1.33
AGITADOR PARA TANQUE DE ASFALTO	HM	2	0.20	20	4.00
INVERTERS BOMBA ASFALTO	HM	2	0.20	350	70.00
MOLINO COLOIDAL CHP-240	HM	1	0.10	600	60.00
COSTO DIRECTO /m2					611.95

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°20. Análisis del costo del pavimento asfáltico con polímero SBS colocado en obra

Rendimiento

80 m³/día

e= 2"

DENOMINACION	UNIDAD	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO	SUB-TOTAL
MANO DE OBRA					13.13
CAPATAZ	HH	1	0.1000	22.11	2.21
OPERARIO	HH	1	0.1000	20.10	2.01
PEON	HH	6	0.6000	14.85	8.91
HERRAMIENTAS					0.66
HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5%	13.13	0.66
EQUIPOS					99.00
CAMION VOLQUETE 15 M3	HM	5	0.5000	120.00	60.00
RODILLO NEUMATICO AUTOPROPULSADO 135HP 9- 26 ton	KWH	1	0.1000	120.00	12.00
RODILLO TANDEM VIBRATORIO AUTOPROPULSADO 130 HP 9- 11 ton	HM	1	0.1000	120.00	12.00
PAVIMENTADORA SOBRE LLANTAS 105 HP 10-16'	HM	1	0.1000	150.00	15.00
SUB PARTIDA					795.54
ELABORACION DE MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE	m ³		1.3000	611.95	795.54
COSTO DIRECTO /m³					711.25

Fuente: Elaboración propia

Son setecientos once con 25/100 soles por m³ de pavimento



Figura N°18: Comparación a nivel de costos entre la mezcla asfáltica convencional y la modificada
Fuente: Silvestre (2017)

5.2.2 Análisis del resultado costo-beneficio

Si bien el costo de aplicación de los asfaltos modificados es mayor que los convencionales, como se muestra en la figura N°18, la vida útil al agregar polímeros se incrementa debido a sus cualidades en cuanto a durabilidad y resistencia, como lo explica en el la figura N°18 donde AC corresponde al asfalto convencional y AMP al asfalto modificado con polímeros.

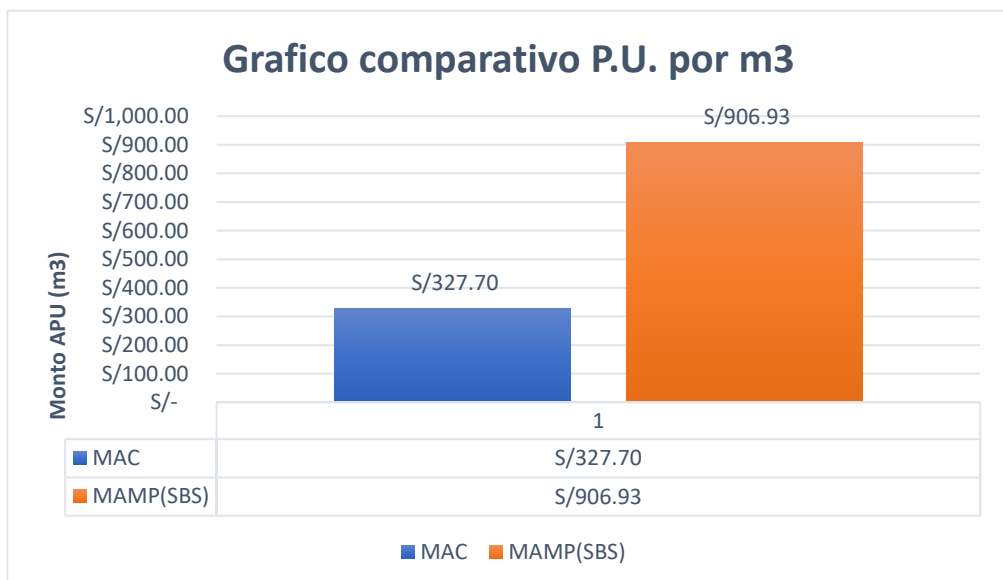


Figura N°19: Gráfico Comparativo del precio unitario por m3 entre la MAC Y MAMP (SBS)

Fuente: Elaboración propia

Silvestre determina en su investigación una diferencia de hasta diez años de vida útil del pavimento modificado vs el pavimento convencional y analizando la figura N° 18 se puede evidenciar que la inversión inicial no solo se recupera en relación al pavimento convencional, sino que se vuelve mucho menor en un estimado.

5.3 Contrastación de hipótesis

5.3.1 Hipótesis específica 1

Hipótesis alternativa (Hi 1): Al comparar las propiedades del asfalto virgen y modificado con polímero SBS, se demostrará la optimización del asfalto virgen para su utilización en zonas cálidas y frías.

Hipótesis Nula (Ho 1): Al comparar las propiedades del asfalto virgen y modificado con polímero SBS, no se demostrará la optimización del asfalto virgen para su utilización en zonas cálidas y frías.

De acuerdo al análisis de resultados del asfalto virgen y asfalto modificado con polímero SBS detalladas en las tablas N° 7 y N° 8, se observa que existe optimización en las propiedades del asfalto, ósea reduce la penetración y aumenta la recuperación elástica, de esta forma queda demostrado el óptimo comportamiento que tendrá la mezcla en servicio, para el PEN 60/70 que será utilizado en zonas cálidas, así como para el PEN 120/150 en zonas frías por lo que se valida la hipótesis alternativa Hi 1.

5.3.2 Hipótesis específica 2

Hipótesis alternativa (Hi 2): Al comparar el desempeño, estabilidad y flujo de las mezclas asfáltica convencional y modificada con polímero SBS, se demostrará los beneficios de utilizar mezclas asfálticas modificadas con polímero SBS en zonas cálidas y frías.

Hipótesis Nula (Ho 2): Al comparar el desempeño, estabilidad y flujo de las mezclas asfáltica convencional y modificada con polímero SBS, no se demostrará los beneficios de utilizar mezclas asfálticas modificadas con polímero SBS en zonas cálidas y frías.

De acuerdo al análisis de resultados de las mezclas asfálticas modificadas con polímero SBS detalladas en la tabla N° 10 se observa que existe una optimización en el desempeño, estabilidad y flujo del asfalto modificado con

polímero SBS a comparación de la mezcla asfáltica convencional tanto para el PEN 60/70 y PEN 120/150 por lo tanto se valida la hipótesis alternativa Hi 2.

5.3.3 Hipótesis específica 3

Hipótesis alternativa (Hi 3): Determinado la rentabilidad a través de un análisis costo – beneficio de las mezclas asfálticas modificadas con polímeros, se optimiza los costos a mediano y largo plazo debido a que estos no requieren de un mantenimiento prematuro por lo tanto se extiende la vida útil del pavimento.

Hipótesis nula (Ho3): Determinando la rentabilidad a través de un análisis costo-beneficio de las mezclas asfálticas modificadas con polímero SBS no se optimizan los costos a mediano y largo plazo.

De acuerdo al análisis de costo-beneficio de la mezcla asfáltica modificada con el polímero SBS detallada en la figura N°18, el precio unitario inicial se incrementa respecto a una mezcla asfáltica convencional. Este incremento inicial es compensado a mediano y largo plazo gracias a los beneficios que brinda una mezcla asfáltica modificada con polímero SBS como son evidenciados en el desempeño y comportamiento mecánico, por lo tanto, se valida la hipótesis alternativa 3.

CONCLUSIONES

1. De acuerdo con los ensayos de caracterización de asfaltos tanto para el CA- 20 (PEN 60/70) y el PEN 120/150, la adición de polímeros entre el 2% y 4% en el Asfalto virgen influye en el grado de penetración haciendo que se vuelva más viscoso y menos dúctil a medida que se le va aumentando el porcentaje de polímero. En cuanto al ensayo de recuperación elástica generalmente el asfalto virgen tiene entre 8% a 13% mientras que el asfalto modificado llega a una recuperación entre el 60% y 90% para zonas cálidas y frías, ósea la recuperación Elástica con la adición de polímeros mejora entre 4 a 11 veces a comparación del asfalto virgen lo cual es de beneficioso, ya que al ser expuestas a cargas de tránsito su desempeño será mejor.
2. El desempeño, de acuerdo al ensayo Hamburg Wheel Tracking demuestra que usar el polímero SBS ya sea para zona cálida o fría mejora la resistencia a la deformación permanente más de cuatro veces el valor de la deformación permanente de una mezcla convencional. De acuerdo al ensayo de Vida Fatiga se demuestra que las mezclas asfálticas modificadas con polímero SBS resisten más de tres veces las deformaciones plásticas a comparación de una mezcla convencional. De acuerdo con el ensayo de módulo resiliente, se demuestra en los ensayos realizados en países vecinos que existe una mejoría en la mezcla asfáltica modificada con polímero SBS a comparación de una mezcla convencional; es decir, presenta una mejor recuperación plástica debido a las cargas cíclicas. Sobre la estabilidad y flujo en la Figura N°15, el uso del polímero SBS añadido generó un notable incremento en la estabilidad. Este incremento es evidenciado en la resistencia a los desplazamientos y deformaciones es decir que mantendrá por mucho más tiempo su forma bajo cargas repetitivas
3. Según el análisis Costo-Beneficio de la mezcla asfáltica convencional y la mezcla asfáltica modificada con polímero SBS, nos indican que existe un incremento del precio inicial y según la investigación de Silvestre realizada en el 2017 determina una diferencia de hasta diez años de vida útil del pavimento modificado vs el pavimento convencional; al analizar la figura N°17 se evidencia que la inversión inicial no solo se recupera en relación al pavimento convencional, sino que se vuelve mucho menor en un estimado de 15 años.

RECOMENDACIONES

1. Es necesario encontrar el porcentaje óptimo del polímero SBS ya que si se le adiciona más de lo debido éste hace que el asfalto se vuelva más viscoso y por ende más frágil, pudiendo ser susceptible al agrietamiento en zonas frías.
2. Es necesario tener en cuenta, el manejo de especificaciones y normativas vigentes, que permitan obtener resultados confiables para la investigación, es recomendable el uso de las normativas ASTM y AASHTO para ser tomados como guías para la realización de ensayos, así como de lo estipulado en las ediciones del Instituto del Asfalto.
3. Para la fabricación de mezclas asfálticas es necesario preguntarse ¿Dónde queda ubicada la obra por ejecutar?, para de esta manera establecer el tipo de ligante a emplear y la otra pregunta ¿Qué comportamiento esperamos de la mezcla asfáltica modificada?, a fin de definir el tipo de polímero SBS que más se acerque a requerimiento deseado.
4. Es recomendable realizar ensayos de desempeño en todos los proyectos de pavimentos flexibles, ya que de esta forma será posible simular la realidad a la que estará expuesta en servicio 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, es recomendable 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 BIBLIOGRAFICAS

- 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>
- Balbin, M. L., & Enriquez, R. F. (2020). *INFLUENCIA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON POLÍMEROS EN ZONAS CÁLIDAS DE PERÚ*.
- Borja, T. S., & Cardenas, 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., Rodriguez, R. N., & Calderon, B. J. (2018). *Fundamentos Micro Y Macroscópicos de la Modificación del Asfalto Convencional con Polímeros*.
- Canevarolo, J. S. (2006). *Ciencia dos polímeros* (Segunda ed.). Artiliber. 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.,%20Sebastia%CC%83o%20V..pdf
- Huaman, & Huauya. (2020). *Cálculo de un pavimento flexible con mezcla asfáltica incorporando polímero (SBS) para el distrito de Villa El Salvador*.
- Huaman, N. G., & Chang, A. C. (2015). *La deformación permanente en las mezclas asfálticas y el consecuente deterioro de los pavimentos asfálticos en el Perú*. doi:https://doi.org/10.31381/perfiles_ingenieria.v2i11.402
- Institute Asphalt. (1982). *principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente*. EEUU: Administración Federal de Autopistas.
- Lopez, 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>
- Mendez, J. R. (2012). *Ingeniería de Pavimentos*. Lima - Peru: Instituto de la Construcción y Gerencia.
- Montejo, A. (2002). *INGENIERIA DE PAVIMENTOS PARA CARRETERAS*. Bogota: Stella Valbuena de Fierro.

- Rodriguez, V. F. (2008). *Analisis de pavimento asfaltico modificado con polimero*.
Obtenido de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2008/bmfciw961a/doc/bmfciw961a.pdf>
- Salazar, J. (2011). Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA75.01.22:047). *Metodos y Materiales*, 14.
- Silvestre, D. F. (2017). *Comparación técnica y económica entre las mezclas asfálticas tradicionales y reforzadas con plástico reciclado en la ciudad de Lima-2017*.
Obtenido de https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/1506/Silvestre_VDF.pdf?sequence=1&isAllowed=y

ANEXOS

Anexo 1 :Matriz de Consistencia

Tabla N°21. Matriz de Consistencia

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL
PG: ¿En qué medida la mezcla asfáltica modificada con polímero SBS optimiza las propiedades, desempeño y el costo del pavimento flexible en climas cálidos y fríos del Perú?	OG: Comparar la influencia de la mezcla asfáltica modificada con polímero SBS para la optimización de las propiedades de la mezcla asfáltica, el desempeño y costos del pavimento flexible en climas cálidos y fríos del Perú, año 2021	HG: La influencia de polímeros en mezclas asfálticas, optimiza la resistencia mecánica y costos del pavimento flexible en zonas cálidas y frías del Perú.
PROBLEMAS ESPECIFICOS	OBJETIVOS ESPECIFICOS	HIPOTESIS ESPECIFICAS
PE1: ¿Cuánto mejorara el desempeño de las mezclas asfálticas modificadas con polímero SBS a comparación de las mezclas convencionales en zonas cálidas y frías del Perú?	OE1: Comparar la influencia del polímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) en el comportamiento del asfalto virgen para su uso en zonas cálidas y frías.	HE1: Al determinar la influencia del polímero SBS en el desempeño de la mezcla asfáltica, se demostrará los beneficios de utilizar mezclas asfálticas modificadas para zonas cálidas y frías
PE2: ¿Cuánto mejorara la estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica modificada con polímero SBS a comparación de una mezcla asfáltica convencional en zonas cálidas y frías	OE2: Comparar la influencia del polímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) en el desempeño, estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en zonas cálidas y frías.	HE2: Al determinar la influencia del polímero SBS en la estabilidad y flujo, se demostrará los beneficios de utilizar mezclas asfálticas modificadas con polímero SBS en zonas cálidas y frías
PE3: ¿Cuál será la rentabilidad de utilizar mezclas asfálticas modificadas con polímeros?	OE3: Determinar la rentabilidad de utilizar mezclas asfálticas modificadas con polímeros haciendo un análisis de costo – beneficio para la optimización de costos	HE3: Determinado la rentabilidad a través de un análisis costo – beneficio de las mezclas asfálticas modificadas con polímeros, se optimiza los costos.

Fuente: Elaboración propia

Anexo 2 :Operacionalización de Variables

Tabla N°22. Operacionalización de Variables

VARIABLE	INDICADORES	INDICES	INSTRUMENTO
VARIABLE INDEPENDIENTE			
Polímero SBS	Durabilidad Capacidad elástica	Degradación Ductilidad	Artículos, tesis naciones e internacionales
VARIABLE DEPENDIENTE			
Propiedades de la mezcla asfáltica	Durabilidad	PEN	Artículos, tesis naciones e internacionales
	Adhesión y cohesión	Ductilidad	
	Susceptibilidad a la temperatura	Temperatura	
	Endurecimiento y envejecimiento	Temperatura	
	Ensayo Hamburgo Wheel tracking	Profundidad de ahuellamiento	
	Ensayo del módulo residencia	Resistencia a la tracción indirecta	
	Ensayo de vida fatiga	Resistencia a la fatiga	
	Ensayo de desgaste	Modulo residencia	
Ensayo de tracción indirecta	Porcentaje de desgaste superficial		
Precio unitario	Costo beneficio		

Fuente: Elaboración 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).

- **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.
- **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.
- **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.