



UNIVERSIDAD RICARDO PALMA

ESCUELA DE POSGRADO

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA VIAL CON MENCIÓN EN
CARRETERAS, PUENTES Y TÚNELES**

**Desempeño óptimo de una mezcla asfáltica en caliente modificada con
Polímero Styrene Butadiene Styrene**

TESIS

Para optar el grado académico de Maestro en Ingeniería Vial con mención
en Carreteras, Puentes y Túneles

AUTOR

Bachiller Quispe Torres, Guillermo

(ORCID: 0000-0001-9604-9957)

ASESOR

Doctor Chavarry Vallejos, Carlos Magno

(ORCID: 0000-0003-0512-8954)

Lima, Perú

2022

Metadatos Complementarios

Datos de autor

Quispe Torres, Guillermo

Tipo de documento de identidad del AUTOR: DNI

Número de documento de identidad del AUTOR: 09798692

Datos de asesor

Doctor Chavarry Vallejos, Carlos Magno

Tipo de documento de identidad del ASESOR: DNI

Número de documento de identidad del ASESOR: 07410234

Datos del jurado

JURADO 1: Doctor Valencia Gutiérrez, Andrés Avelino, DNI N°07065758, ORCID 0000-0002-8873-189X

JURADO 2: Doctor Tamara Rodríguez, Joaquín Samuel, DNI N°31615059, ORCID 0000-0002-4568-9759

JURADO 3: Doctor Altamirano Herrera, Aníbal, DNI N°10426902, ORCID 0000-0003-2940-0078

Datos de la investigación

Campo del conocimiento OCDE: 732527

Código del Programa: 2.01.05

Página del jurado

Dr. Andrés Avelino Valencia Gutierrez

Presidente

Dr. Joaquín Samuel Tamara Romero

Miembro

Dr. Aníbal Altamirano Herrera

Miembro

Dr. Carlos Magno Chavarry Vallejos

Asesor

Mg. Leonardo Huertas Mantilla

Representante de la Escuela de Posgrado

Lima, julio del 2022

Dedicatoria

A mi familia, en especial a Delia Luz mi querida esposa y mis hijos Danaluz Valeria y Guillermo Zuriel por su amor, apoyo y comprensión para este logro; a mis padres Jacinta y Guillermo que me brindaron todo su apoyo a lo largo de mi carrera universitaria.

Agradecimientos

A Dios por ser fuente de inspiración para caminar sin temer los obstáculos.

A la Universidad Ricardo Palma por acogerme y brindarme el desarrollo de capacidades en el fortalecimiento de mi profesión.

Al Dr. Ing. Carlos Chavarry Vallejo, por su apoyo y asesoramiento a lo largo de esta investigación; al Mg. Ing. Juan Carlos Peña Anccasi por su invaluable apoyo para este gran logro, gracias mi querido amigo.

Índice General

Página del jurado	i
Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Índice	iv
Lista de tablas	vi
Lista de figuras	vii
Resumen	viii
Abstract	ix
Introducción	x

CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema	1
1.2. Formulación del problema	2
1.2.1. Problema general	2
1.2.2. Problemas específicos	3
1.3. Importancia y Justificación del Estudio	3
1.4. Delimitación del estudio	5
1.5. Objetivos de la investigación	5
1.5.1. Objetivo general	5
1.5.2. Objetivos específicos	5

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. Marco histórico	7
2.2. Investigaciones relacionadas con el tema	8
2.3. Estructura teórica y científica que sustente el estudio	22
2.3.1. Cemento asfáltico	22
2.3.2. Procedimiento de obtención del asfalto	22
2.3.3. Asfaltos modificados	24
2.3.4. Generalidades sobre el copolimero SBS	25
2.3.5. Propiedades de mezcla asfáltica en caliente	26
2.3.6. Pavimento de concreto asfáltico en caliente	29
2.3.7. Método Marshall	36
2.3.8. Método de diseño SuperPave	37
2.3.9. Ensayo del efecto de la humedad a la Tensión Diametral	41
2.3.10. Vida a la Fatiga (BBF)	42
2.3.11. Rueda de Hamburgo	42

2.4. Definición de términos básicos	43
2.5. Fundamentos teóricos que sustentan la hipótesis	45
2.6. Hipótesis	46
2.6.1. Hipótesis general	46
2.6.2. Hipótesis específica	46
2.7. Variables	46
2.7.1. Variable independiente	46
2.7.2. Variable dependiente	46
2.7.3. Variable interviniente	46
2.8. Relación entre variables	47
CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO	48
3.1. Método, tipo y diseño de investigación	48
3.1.1. Método de investigación	48
3.1.2. Tipo de investigación	49
3.1.3. Nivel de investigación	49
3.1.4. Diseño de investigación	49
3.2. Población y muestra	50
3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	52
3.4. Descripción de procedimientos de análisis	53
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	54
4.1. Resultados	54
4.2. Análisis de resultados	67
4.3. Discusión de resultados	71
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	76
Conclusiones	76
Recomendaciones	78
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
ANEXOS	

Lista de tablas

Tabla 01. Agregados gruesos	29
Tabla 02. Agregados finos	30
Tabla 03. Requerimientos para usos granulométricos	31
Tabla 04. Requerimientos para gradación de mezclas	31
Tabla 05. Selección del tipo de asfalto	32
Tabla 06. Especificaciones del cemento asfáltico clasificado por penetración	32
Tabla 07. Mezcla del concreto bituminoso	33
Tabla 08. Requisitos de adherencia	34
Tabla 09. Vacíos mínimos en el agregado mineral	34
Tabla 10. Requerimientos de cemento asfáltico modificado con polímero	34
Tabla 11. Requerimientos de cemento asfáltico modificado con polímero	35
Tabla 12. Requerimientos de cemento asfáltico modificado con polímero	36
Tabla 13. Propósito de las pruebas de asfalto superpave	40
Tabla 14. Operacionalización de variables	47
Tabla 15. Cantidad de muestras para determinar el óptimo de asfalto	50
Tabla 16. Cantidad de muestra para medir desempeño AASHTO T283	51
Tabla 17. Cantidad de muestra para medir desempeño AASHTO T321	51
Tabla 18. Cantidad de muestra para medir desempeño AASHTO T324	51
Tabla 19. Cemento asfáltico clasificado por penetración	56
Tabla 20. Análisis granulométrico por tamizado	57
Tabla 21. Husos granulométricos ASTM D-5 3515	58
Tabla 22. Combinación de agregados	58
Tabla 23. Resultado de diseño Marshall – polímero 2.5%	61
Tabla 24. Resultado de diseño Marshall – polímero 3.5%	61
Tabla 25. Resultado de diseño Marshall – polímero 4.5%	62
Tabla 26. Óptimo de asfalto modificado con polímero SBS	63
Tabla 27. Resultado TSR asfalto modificado con polímero SBS	65
Tabla 28. Resultado Rueda de Hamburgo, asfalto modificado con polímero SBS	68
Tabla 29. Resultado Fatiga, asfalto modificado con polímero SBS	70

Lista de figuras

Figura 01. Rendimiento del cemento asfáltico residual	23
Figura 02. Obtención del asfalto	23
Figura 03. Comportamiento esperado de ligante modificado	25
Figura 04. Representación esquemática de elastómero termoplástico	25
Figura 05. Grafica de abscisas granulometría SuperPave	38
Figura 06. Gradación máxima densidad tamaño máximo 19mm	39
Figura 07. Límites para granulometrías SuperPave	39
Figura 08. Evolución de las etapas críticas de la vida de asfalto	41
Figura 09. Fundamento teórico que sustenta la hipótesis	45
Figura 10. Gradación de agregados	58
Figura 11. Briquetas compactadas – martillo Marshall	60
Figura 12. Briquetas compactadas en baño maría 60°C	60
Figura 13. Ensayo de rotura de probetas – Marshall	60
Figura 14. Estabilidad vs % de asfalto modificado con polímero	63
Figura 15. Flujo vs % de asfalto modificado con polímero	64
Figura 16. TSR vs % de asfalto modificado con polímero	65
Figura 17. Espécimen de 1500mm x 60mm de ensayo Rueda de Hamburgo	66
Figura 18. Procedimiento de ensayo Rueda de Hamburgo	66
Figura 19. Espécimen – ensayo vida de fatiga	67
Figura 20. Procedimiento de ensayo de vida de fatiga	67
Figura 21. Deformación vs % de polímero	69
Figura 22. Deformación vs número de pasadas	69
Figura 23. Óptimo contenido de asfalto a través de ensayos de desempeño	74
Figura 24. Óptimo contenido de asfalto y polímero vs Ahuellamiento y fatiga	75

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo determinar el porcentaje de incorporación de polímero SBS y tasa adecuada de cemento asfáltico que incrementa el desempeño de la mezcla asfáltica en caliente medidos en parámetros Marshall, TSR, fatiga y ahuellamiento. La metodología es deductiva, de orientación aplicada y de enfoque cuantitativo, ya que de acuerdo a la teoría existente analizamos los polímeros SBS de tipo elastómero, que mejora las propiedades reológicas del asfalto, con lo cual resolvemos el problema de fatiga y ahuellamiento en la mezcla asfáltica en caliente, incorporando diferentes porcentajes de polímero SBS (2.5%, 3.5% y 4.5%), con ello obtener parámetros que demuestren el incremento a parámetros de desempeño (fatiga y ahuellamiento). El tipo de investigación es descriptiva, como primer punto se caracteriza la granulometría ASTM D 3515 D-5, PEN 85/100 y polímero elastómero SBS, asimismo para correlacionar las variables, se incorpora el polímero SBS al asfalto, y finalmente se explica los parámetros obtenidos a través de los ensayos Marshall (Estabilidad – Flujo), TSR, Rueda de Hamburgo y Vida a la Fatiga. La investigación determino los contenidos óptimos de asfalto para cada tasa de polímero SBS que fue de: 5.6% CA - 2.5% polímero, 5.5% CA - 3.5% polímero, 5.7% - 4.5%. en función del ensayo Marshall, a partir de encontrar las tasas de asfalto se construyó 114 briquetas. Para tasas de polímero SBS 2.5%, 3.5% y 4.5%, se encuentran valores de resistencia en fatiga, los numero de ciclos alcanzados incrementan de 1.5 a 2 veces el valor, 1061040 y 1417090 respectivamente, asimismo, los valores de deformación permanente alcanzan valores de 8.07 mm, 6.16 mm y 3.65 mm, estando por debajo de lo especificado que es 12.00 mm. en cuanto al ensayo de TSR con una tasa asfalto de 5.5% y 3.5% de polímero SBS alcanza un valor máximo de 87.8%, asimismo con 4.5% de polímero disminuye el TSR a 83.6%. En conclusión, es recomendable utilizar un mínimo de tasa 5.5% de asfalto y de 3% a 3.5% de polímero SBS, con lo cual estaría cumpliendo el requerimiento para obtener una mezcla balanceada que satisfaga parámetros de fatiga y ahuellamiento.

Palabras claves: Mezcla asfáltica en caliente, polímero SBS, fatiga, ahuellamiento.

ABSTRACT

The objective of this research was to determine the percentage of incorporation of SBS polymer and adequate rate of asphalt cement that increases the performance of the hot asphalt mixture measured in Marshall parameters, TSR, fatigue and rutting. The deductive methodology, applied orientation and quantitative approach, since according to the existing theory we analyze the elastomeric type SBS polymers, which improves the rheological properties of the asphalt, with which we solve the problem of fatigue and rutting in the asphalt mixture. hot, incorporating different percentages of SBS polymer (2.5%, 3.5% and 4.5%), thereby obtaining parameters that demonstrate the increase in performance parameters (fatigue and rutting). The type of research is descriptive, as a first point the granulometry ASTM D 3515 D-5, PEN 85/100 and SBS elastomeric polymer is characterized, also to correlate the variables, the SBS polymer is incorporated into the asphalt, and finally the parameters are explained. obtained through the Marshall tests (Stability - Flow), TSR, Hamburg Wheel and Fatigue Life. The investigation determined the optimal asphalt contents for each sbs polymer rate, which was: 5.6% CA - 2.5% polymer, 5.5% CA - 3.5% polymer, 5.7% - 4.5%. Based on the Marshall test, 114 briquettes were built from finding the asphalt rates. For SBS polymer rates of 2.5%, 3.5% and 4.5%, values of fatigue resistance are found, the number of cycles reached increase from 1.5 to 2 times the value, 1061040 and 1417090 respectively, likewise, the values of permanent deformation reach values of 8.07 mm, 6.16 mm and 3.65 mm, being below what is specified which is 12.00 mm. Regarding the TSR test with an asphalt rate of 5.5% and 3.5% of SBS polymer, it reaches a maximum value of 87.8%, also with 4.5% of polymer the TSR decreases to 83.6%. Conclusion, it is advisable to use a minimum rate of 5.5% asphalt and 3% to 3.5% SBS polymer, which would meet the requirement to obtain a balanced mixture that satisfies fatigue and rutting parameters.

Keywords: Hot mix asphalt, SBS polymer, fatigue, rutting.

INTRODUCCIÓN

Las carreteras son un activo muy importante para cualquier país dentro de su crecimiento económico, para lo cual, los recursos utilizados que se invierte en ello son costosos y demandan un mantenimiento adecuado a lo largo de su vida útil. En nuestro país las carreteras que predominan son los ejes longitudinales que abarcan las regiones de costa, sierra y selva a nivel de pavimentos definitivos, constituidos por mezclas asfálticas en caliente, donde el asfalto es el activo principal, sin embargo existen factores que generan una pérdida de este activo como son, las altas tasas de vehículos que generan grandes cargas al pavimento, variabilidad climática, baja calidad en la producción de material pétreo y lo que conlleva a problemas que afectan a la mezcla asfáltica como son: agrietamiento por fatiga, deformación permanente, mala resistencia al daño por humedad,

El comportamiento de la mezcla asfáltica depende de cada uno de sus componentes y sus propiedades individuales de cada material. Por lo que muchos estudios centran su principal atención en el ligante asfáltico, ya que la baja calidad del mismo puede llegar a desperdiciar las inversiones generadas. “Es por ello que en algunos casos las propiedades de los asfaltos convencionales resultan insuficientes y no satisfacen las expectativas como para cumplir determinado período de servicio, es decir menor resistencia al envejecimiento, su poca durabilidad se refleja en deformaciones y fisuras dentro de una carpeta asfáltica” Ortiz Hernández H. Et. Al (2017). En consecuencia, frente a este problema, se busca que la construcción de pavimentos innove en la búsqueda de nuevas tecnologías, que satisfaga el buen comportamiento del ligante asfáltico para poder ayudar a contrarrestar los efectos de fatiga y ahuellamiento que tanto aqueja los pavimentos de las carreteras del país, es por ello que se debe buscar que el ligante asfáltico supere sus propiedades, para ello, se busca en modificar su reología a través de la incorporación de polímeros, desechos de construcción todo material nuevo que mejore el desempeño del asfalto, con una mejora continua de las actividades medio ambientales en cumplimiento de los estándares de competitividad en infraestructura vial.

La presente investigación pretende alcanzar el objetivo de incrementar el desempeño de la mezcla asfáltica en caliente con un óptimo contenido de asfalto modificado con polímero SBS, que satisfaga parámetros de fatiga y ahuellamiento medidos a través de ensayos Super Pave. La incorporación de polímero SBS al ligante asfáltico, estaría garantizando un incremento en la mejora de sus propiedades reológicas por ende un buen desempeño de la mezcla asfáltica en caliente, en consecuencia, estos

porcentajes de polímero SBS buscara el resultado adecuado que satisfaga todos los parámetros a medir.

La tesis se realizó en 4 capítulos las cuales se detallan a continuación:

El primer capítulo presenta descripción de la realidad problemática de los pavimentos en nuestro país en cuanto a su nivel de falla (fatiga y ahuellamiento), asimismo la importancia y justificación de la utilización de nuevos materiales que ayuden a mejorar las propiedades reológicas del ligante asfáltico, como son los polímeros. Finalmente, la delimitación de la investigación, así como los objetivos a alcanzar.

El segundo capítulo detalla antecedentes históricos nacionales e internacionales sobre las mezclas asfálticas en caliente, incorporación de distintos tipos de polímeros plastomeros y elastómeros, la estructura teórica y científica que sustenta la investigación, la formulación de Hipótesis y operacionalización de variables.

El tercer capítulo presenta marco metodológico referido al método, tipo nivel y diseño de investigación, se hace referencia a la población y muestra utilizada, y finalmente se plasma las técnicas e instrumentos de recolección de datos, se procede a describir todos los procedimientos de análisis de la modificación del ligante asfáltico con polímero SBS.

El cuarto capítulo presenta resultados y análisis de las tasas de incorporación de polímero SBS al ligante asfáltico y su resonancia en el desempeño de la mezcla asfáltica en caliente, de la misma manera, se realiza la discusión de los resultados en comparación con los antecedentes, y la contrastación de hipótesis.

Finalmente se describen las conclusiones y recomendaciones y el aporte que tienen los polímeros de tipo SBS en el incremento al desempeño de la mezcla asfáltica en caliente.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

La mayoría de pavimentos en los países a nivel mundial, están contruidos principalmente de asfalto denominado pavimentos flexibles, lo que significa que es la alternativa de pavimentación más económica como técnica en obras de infraestructura vial, asimismo esto repercute en el crecimiento y desarrollo de un país. Según el reporte de Provias Nacional (2017), las obras viales terminadas ascienden a 2025.87 km (pavimento definitivo), obras viales que se encuentran en ejecución asciende a 804.1 km. En consecuencia, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones proyecta para el año 2022 el 100% de pavimentación de la Red Vial Nacional ya que actualmente se tiene un avance de 75%. Asimismo, se debe tener en consideración que las obras a nivel de pavimento asfáltico sufren inconvenientes y fallas dentro de su vida útil y que estas han generado una disminución considerable en su efectividad y durabilidad.

Ante esta realidad existe la necesidad de mejorar la tecnología de los pavimentos asfálticos en el Perú a fin que estos logren alcanzar la vida útil para la que fueron diseñados. Huamán, Néstor (2012).

El Perú consta de 3 zonas geográficas definidas (Costa, Sierra y Selva), dentro de ellas existen regiones con grandes actividades económicas, siendo la región Lima sin duda, donde se concentran todas las actividades de comercio del país. La integración hacia esta región está conectada a través de carreteras a nivel de asfalto en caliente con elevados porcentajes de tránsito pesado, existiendo la posibilidad que presenten deterioros en el pavimento como fatiga y ahuellamiento.

Gran parte del deterioro prematuro del pavimento se debe al comportamiento de los materiales que lo conforman, al estar sometido no solo al tráfico pesado, a la variación en el gradiente de temperaturas que en nuestro país es una realidad, así como a condiciones climatológicas como la radiación ultra violeta que genera además de fatiga y ahuellamiento, también envejecimiento del pavimento, que se ven reflejados por los diferentes tipos de fallas como agrietamientos y deformaciones en la carpeta de rodadura, que aterrizan finalmente en el incumplimiento de su vida útil para el cual fueron diseñados.

Parte de este problema radica en una simple caracterización de los materiales y de la mezcla asfáltica en caliente que solamente satisface parámetros volumétricos,

estabilidad y flujo según lo establece las EG-2013. Asimismo, la caracterización del asfalto no es la adecuada, ya que aún se sigue utilizando los asfaltos tradicionales y que en la actualidad para la mejor performance debe ser modificada con polímero. En cuanto a las metodologías de diseño también se tiene un escaso conocimiento ya que la metodología tradicional usada en nuestro país es del tipo estático (Marshall) relacionado a especificaciones en volumetría.

La metodología usada tradicionalmente no permite predecir el desempeño del asfalto en servicio durante su vida útil; específicamente, como obtenemos esos parámetros de control de ahuellamiento y fatiga que son las más comunes que generan deterioros en los pavimentos asfálticos sobre todo en presencia de humedad; más aún, como logramos eliminar especificaciones relacionados con respecto a volumetría y dejarlo más específica a pruebas de desempeño, ya que en estos tiempos las mezclas asfálticas incorporan polímeros, materiales como caucho, plásticos entre otros, que mejoran las propiedades reológicas del asfalto y lo hacen más duradero en el tiempo y esto conlleva a que con ensayos de desempeño pueda satisfacer la mezcla asfáltica en caliente.

En consecuencia, se debe buscar un diseño óptimo de la mezcla asfáltica en caliente incorporando polímeros, ya que es la tendencia actual de la elaboración de mezclas asfálticas en el mundo, que mejoran las propiedades físico – mecánicas del asfalto y que sobre ello dé como marco de referencia a ensayos de desempeño que tiene la metodología Superpave, teniendo como base un diseño de mezcla asfáltica modificada con polímero con la metodología Marshall; es decir un diseño volumétrico estático con verificación de desempeño a través de ensayos dinámicos.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general.

¿De qué manera influye el porcentaje de asfalto modificado con polímero SBS en el desempeño óptimo a fatiga y ahuellamiento de una mezcla asfáltica en caliente, mediante los ensayos de Superpave?

1.2.2. Problemas específicos.

- a) ¿Cómo influye el porcentaje de asfalto con la incorporación de un polímero SBS en el desempeño óptimo a fatiga de una mezcla asfáltica en caliente, mediante el ensayo de Viga de Fatiga?
- b) ¿Cómo influye el porcentaje de asfalto con la incorporación de un polímero SBS en el desempeño óptimo a ahuellamiento de una mezcla asfáltica en caliente, mediante el ensayo de Rueda de Hamburgo?
- c) ¿En qué medida incide el porcentaje de asfalto con la incorporación de un polímero SBS en el desempeño óptimo a humedad de una mezcla asfáltica en caliente, mediante el ensayo de TSR?

1.3. Importancia y justificación del estudio

La utilización de metodologías actuales son soluciones tecnológicas para cubrir las necesidades de incrementar la vida útil del pavimento. Incorporar en el diseño verificación de desempeño, puede prever resistencia y durabilidad al ahuellamiento y fatiga; en el proceso de diseño se someterá a ensayos dinámicos como es la Rueda de Hamburgo y Viga de fatiga, más a la resistencia al daño por humedad ensayo TSR. Entendemos que los problemas que afectan a la mezcla asfáltica en el pavimento son: agrietamiento por fatiga, deformación permanente, el envejecimiento y daño a la humedad, esta investigación pretende alcanzar un diseño optimo que satisfaga todos los parámetros volumétricos descritos en la metodología Marshall y los parámetros de desempeño de la metodología Superpave garantizando el óptimo contenido de asfalto modificado con polímero SBS y constituir mezclas que al ser sometidas a diferentes condiciones de carga y clima respondan de manera satisfactoria. Como alcance la investigación marca una referencia a metodologías que den mayor peso a ensayos de desempeño, que son pruebas dinámicas; pero dando su importancia también a metodologías de diseño estativas basados en volumetría, siendo esta una referencia inicial para hallar el contenido de asfalto optimo modificado con polímero SBS a someterse luego a verificaciones por desempeño para afinar y mejorar la resistencia y durabilidad de la mezcla asfáltica que será colocada en obra.

1.3.1. Justificación

Justificación teórica

Esta investigación se realiza con el propósito de desarrollar marco de referencia en cuanto a los ensayos de desempeño y el estado de las prácticas de las mezclas asfálticas, en este caso en caliente; aportar conocimiento existente a la metodología de diseño Marshall con verificación de desempeño a través de ensayos Superpave con la finalidad estudiar el comportamiento de los parámetros de fatiga y ahuellamiento, esto a fin de optimizar el diseño de mezclas asfálticas en caliente modificadas con polímero SBS y así prolongar la vida útil del pavimento. En suma, se trata de estudiar los distintos contenidos de asfalto modificado con polímero SBS que cumplan en las pruebas de desempeño en la mezcla asfáltica en caliente y encontrar un óptimo contenido de asfalto para ambos casos (fatiga y ahuellamiento).

Justificación practica

En los tiempos actuales, el diseño de los pavimentos asfálticos con las metodologías estandarizadas por la normativa técnica como la AASHTO, como el método Marshall y Superpave, están limitadas a especificaciones respecto a volumetría; se hace cada vez más importante dejarla más específica a pruebas de desempeño, en nuestro caso para poder manejar mejor parámetros de ahuellamiento y fatiga de un pavimento asfáltico y prever su desempeño óptimo durante su servicio en su vida útil; más aún en estos tiempos la necesidad de incorporar a las mezclas asfálticas polímero, caucho, plástico y otros producido por la industria y los contratistas proveedores de asfalto, que ven limitadas la comercialización por especificaciones relacionadas a volumetría más que a desempeño. Por lo tanto, surge la necesidad de incorporar metodologías para el diseño de las mezclas asfálticas en caliente modificada con polímero que garanticen la construcción de carpetas asfálticas resistentes y durables en su vida útil prevista, para que de esta manera generar proyectos que sean sostenibles. Es así que esta investigación pretende desarrollar un marco de referencia en el diseño óptimo de la mezcla asfáltica en caliente modificada con polímero SBS, incorporando parámetros de desempeño sin dejar de lado el diseño volumétrico y que en consecuencia se halle el contenido de asfalto modificado con polímero que satisfaga ambos parámetros (fatiga y ahuellamiento).

1.4. Delimitación del estudio

Delimitación geográfica

El Departamento de Huancavelica dentro de sus lineamientos de desarrollo sostenible es uno de los Departamentos que concentra mayor cantidad de carreteras departamentales, asimismo, presenta un auge importante en comercio y ganadería, los productos que se trasladan a la capital del país son por corredores económicos del departamento de Huancavelica. La región Huancavelica tiene diferentes zonas climáticas, las más importantes fluctúan entre 3800 msnm – 2380 msnm, asimismo posee carreteras a nivel de asfalto en caliente que la conectan con el interior del país, las cuales, con un tránsito pesado importante, cada día transporta diferentes productos a los distintos mercados de la capital, es por ello que en la presente investigación toma los parámetros y especificaciones para materiales que constituyen la Mezcla Asfáltica en Caliente como; agregado grueso, agregado fino, filler y el tipo de PEN para altitudes mayores a 3000 msnm de acuerdo a la EG-2013.

Delimitación del conocimiento y tiempo

La presente investigación pretende analizar el desempeño mecánico de la Mezcla Asfáltica en Caliente y optimizar el contenido de asfalto modificado con polímero SBS, asimismo los porcentajes de asfalto modificado estará en relación a satisfacción de los ensayos de Superpave, como son, fatiga y ahuellamiento, los cuales se realizarán a nivel de laboratorio entre los meses de enero y febrero de 2022.

1.5. Objetivos de la investigación

1.5.1. Objetivo general.

Determinar el porcentaje de asfalto modificado con polímero SBS para optimizar el desempeño a fatiga y ahuellamiento de una mezcla asfáltica en caliente, mediante los ensayos Superpave.

1.5.2. Objetivos específicos.

- a) Determinar el porcentaje de asfalto modificado con polímero SBS para optimizar el desempeño a fatiga de una mezcla asfáltica en caliente, mediante el ensayo de Viga de Fatiga.
- b) Determinar el porcentaje de asfalto modificado con polímero SBS para optimizar el desempeño a ahuellamiento de una mezcla asfáltica en caliente, mediante el ensayo Rueda de Hamburgo.

- c) Determinar el porcentaje de asfalto modificado con polímero SBS para optimizar el desempeño a humedad de una mezcla asfáltica en caliente, mediante el ensayo de TSR.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Marco histórico

Para el diseño de pavimentos usualmente se orienta a establecer valores límites de tensiones y deformaciones con el objetivo de garantizar la correcta duración de la vida útil del pavimento. Los criterios de falla comúnmente están asociados a contrarrestar los problemas de fatiga y ahuellamiento en la carpeta asfáltica en caliente, producto de la aplicación repetitiva en exceso de las cargas de tránsito, la mala selección del ligante asfáltico, los materiales que generalmente son los inadecuados. Debido a ello durante años se ha tratado de buscar soluciones óptimas de modificar el asfalto con materiales que garanticen una mejora en las propiedades reológicas, es así que, la modificación de asfalto ha sido tema de estudio por muchos investigadores. La tendencia de mejorar las propiedades reológicas recaen en los polímeros, que, sin duda, han generado expectativas muy buenas en la industria del asfalto, ya que, al incorporar en pequeños porcentajes de polímeros (plastómeros o elastómeros), incrementan la resistencia al daño por humedad, fatiga, ahuellamiento, entre otros.

Estrada E., Víctor (2017), menciona que la modificación con del PEN 85/100 con polímero SBS mejora la estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica en caliente, disminuye el afecto a fatiga y ahuellamiento y prolonga la vida útil del pavimento.

AmirHossein Norouzi (2015), menciona que el agrietamiento por fatiga es uno de los problemas complejos que depende del pavimento estructura, propiedades de la mezcla asfáltica y condiciones ambientales. Durante las últimas décadas, muchas agencias de asfalto han realizado importantes investigaciones para la caracterización de fisuras. Sin embargo, la fatiga sigue siendo difícil de predecir no solo debido a modelos y parámetros, pero también porque este fenómeno en sí no se comprende bien. El punto clave en la predicción del rendimiento de la fatiga es qué modelo usar y cómo encontrar los parámetros correctos para el modelo seleccionado utilizando el más simple pero el más confiable método de prueba. Si bien es cierto que es compleja la determinación de parámetros de fatiga, pero ayuda bastante la modificación del asfalto con polímeros ya que estos nos darán mejor comportamiento a soportar el exceso de cargas de tránsito y una mejor performance con respecto a la variable del clima. Con ello se podría inferir modelos para determinar la resistencia a fatiga en asfaltos modificados con polímeros en relación a su comportamiento frente a ensayos de desempeño.

2.2. Investigaciones relacionadas con el tema

Y.F López, L.E. Sanabria, R. Carreño (2012), menciona los objetivos del trabajo de investigación, que, se debe implementar nuevos e innovadores métodos de diseño de mezclas asfálticas en caliente (HMA) estos deben ser explorados, ya que las nuevas mezclas deben tener características de desempeño mayores, es así como el autor concluye que se realiza la evaluación del Diseño Balanceado por desempeño a fatiga y ahuellamiento como una alternativa innovadora y conocida en el mundo aunque desconocida en el país de Colombia, además realizan una comparación de los resultados obtenidos con el método Marshall tradicionalmente utilizada. Los resultados que encontraron fueron mezclas fabricadas con asfalto original que presentaron signos de susceptibilidad a la humedad a bajos niveles de contenido de asfalto menores a 5%, por lo tanto, no se presenta baches o desprendimiento de la carpeta asfáltica. Para todas las combinaciones de materiales evaluados, los diseños de las Mezclas HMA 4.5% y 5.0% exhibieron un desempeño por resistencia al craqueo marginal menor a 50 ciclos de OT. Estos niveles de contenido de asfalto deben ser rechazados o rediseñados. El aporte de la investigación realizada por el autor, muestra que la evaluación de Diseño Balanceado por desempeño a fatiga y ahuellamiento es una alternativa innovadora y conocida en el mundo, ya que el porcentaje de asfalto está en función del cumplimiento de ambos parámetros.

Dávila Juan Manuel. (2005), menciona que el objetivo de diseño de una mezcla asfáltica es la determinación en proporciones optimas de agregado y asfalto que pueda garantizar un buen comportamiento del pavimento y una adecuada versatilidad para su colocación. Las metodologías hoy en día solo entregan información que permite predecir el porcentaje óptimo del ligante en términos volumétricos y considerando ensayos poco representativos y que al final resulta discutible si interpretación, como es el caso del ensayo Estabilidad – Flujo del método Marshall. Asimismo, el autor realiza la verificación a través de la estimación de módulos y ensayos RLA, si el porcentaje de asfalto realmente es el adecuado. Asimismo, la Población y Muestra que identifico el autor fue de 57 briquetas, estas muestras fueron variando el método de compactación y el contenido de asfalto demostrando que las mezclas compactadas con el martillo Marshall alcanzan valores considerables mayores a la densidad bulk que los encontrados para

briquetas compactadas como compactador giratorio. El autor concluye que para los valores encontrados por la empresa Concescol S.A (5.9%) y el laboratorio de la PUJ (5.7%) menciona que es favorable con los aspectos evaluados (densidad bulk, estabilidad flujo y módulos) también se menciona que el valor encontrado por la empresa Concescol S.A, presenta valores óptimos desempeños en cuanto al flujo, densidad bulk y deformaciones permanentes. El aporte del autor con esta investigación fue que variando el porcentaje de asfalto y variando el método de compactación con el Martillo Marshall las muestras pueden alcanzar valores de densidad bulk, que las encontrada para pastillas compactadas con el compactador giratorio.

Jonathan Vera Silva (2012), el autor menciona que la fatiga por reflexión en mezclas asfálticas ocurre cuando estas son colocadas directamente sobre carpetas fisuradas. Se caracterizó dos tipos de mezclas para verificar su resistencia a fatiga por reflexión para esto el autor diseño e implemento un aparato capaz de simular en laboratorio el movimiento de los bloques en la capa rígida de inferior de una mezcla asfáltica. Se trabajó con un MDC-2 de Invias, estas mezclas fueron caracterizadas por medio de módulos dinámicos, deformación permanente, resistencia a la fatiga y finalmente resistencia a la fatiga por reflexión para diferentes niveles de deformación y temperatura con el objetivo de predecir de manera aproximada el número de ciclos de carga que pueden soportar estas mezclas al ser utilizadas en obras de rehabilitación. El autor concluye que se verifico la repetibilidad de los ensayos en el equipo de reflexión para los valores de deformación de 0.86 mm y 1.3 mm obteniendo coeficientes de variación menores al 25%. Asimismo, se demostró la sensibilidad de la vida a fatiga por reflexión con respecto a las variables del nivel de deformación, temperatura y tipo de mezcla asfáltica. El aporte del autor con esta investigación demuestra que encontró la sensibilidad de vida a fatiga dependen de la temperatura y tipo de mezcla asfáltica.

Sandra P. Roncallo C., Freddy Bautista R. (2013), los autores mencionan que los daños prematuros en el pavimento son atribuibles en gran medida al desconocimiento del desempeño de las mezclas asfálticas frente a los efectos producidos por las condiciones climáticas que afecta a cada ciudad. Estudian el desempeño a fatiga

y ahuellamiento de mezclas en servicio y comparadas con mezclas envejecidas en el laboratorio en cámara UV., utilizaron una mezcla MDC-2 elaborada con asfalto 80-100, por otro lado, extrajeron muestras de pavimento en servicio de la ciudad de Bogotá con el mismo tipo de mezcla. Las muestras fabricadas en el laboratorio se envejecieron en cámara UV durante 100, 200, y 500 horas y las muestras extraídas de campo fueron de edades de 1.5, 3 y 5 años. A estas muestras se realizaron los ensayos de fatiga y ahuellamiento. Los autores concluyeron que las mezclas asfálticas presentan un comportamiento de rigidización producto del envejecimiento por oxidación causado por la radiación ultravioleta – UV. De igual manera se encontró que 500 horas de envejecimiento en cámara UV corresponde a 1.5 años de envejecimiento en campo para el ensayo de fatiga.

Hugo A. Rondón Q., Fredy A. Reyes L. (2012), los autores mencionan en la investigación que realizaron el cambio que experimenta el módulo resiliente, deformación permanente y la resistencia a fatiga de una mezcla asfáltica cuando es expuesta a las condiciones climáticas de la ciudad de Bogotá durante 47 – 48 meses. Las mezclas fueron fabricadas utilizando dos cementos asfálticos CA- 80-100 CA 60 – 70. La tendencia general de las mezclas con el tiempo de exposición es experimentar un aumento en los valores de rigidez debido principalmente a procesos de endurecimiento por envejecimiento del ligante asfáltico. El aumento en rigidez genera incremento en la resistencia al fenómeno de ahuellamiento y en la vida de fatiga de la mezcla analizada cuando ésta sea utilizada para conformar capas asfálticas gruesas en el pavimento. Los autores concluyeron que con base en la evolución del módulo resiliente con el tiempo de exposición al medio ambiente se propone una ecuación para predecir de manera aproximada el cambio que experimenta la vida a fatiga de la mezcla.

Reyhaneh Rahbar-Rastegar. (2017), El autor menciona en la investigación que el agrietamiento en los pavimentos de asfalto es una de las fallas más comunes y críticas del pavimento. Las grietas permiten que el agua penetre desde la superficie hasta las capas subyacentes, lo que resulta en una vida útil del pavimento y mala calidad de conducción. Hay varios factores que afectan el agrietamiento. potencial de las mezclas asfálticas, incluidas las propiedades de los componentes asfálticos, diseño de la mezcla factores, tiempo de carga y modo de carga, temperatura,

estado de estrés y envejecimiento. Mientras que varios Los investigadores han realizado estudios que investigan el agrietamiento de mezclas asfálticas, la eficacia, los parámetros no se comprenden bien para permitir a los ingenieros diseñar y construir pavimentos más resistentes contra las fisuras. Asimismo, El autor proporciona algunas ideas adicionales sobre los efectos de propiedades de los componentes y condición de envejecimiento en el agrietamiento del asfalto. La susceptibilidad al agrietamiento de una mezcla de asfalto en caliente (HMA) se evalúa a través de pruebas experimentales y modelado numérico, en mezclas producidas en etapa de diseño (laboratorio) o producción (planta). Varios criterios y se evalúan con los enfoques para la predicción del agrietamiento en el ligante asfáltico y la mezcla asfáltica, y se discute su correlación. Se simulan diferentes niveles de envejecimiento en laboratorio, y los efectos del envejecimiento en horno a largo plazo (LTOA) sobre los parámetros visco elásticos lineales, fatiga y se exploran las características de fractura de las mezclas asfálticas. La prueba de fatiga por tracción uniaxial basado en un enfoque de daño continuo viscoelástico simplificado (SVECD) se lleva a cabo para caracterizar el comportamiento de fatiga y flexión semicircular (SCB), tensión compacta en forma de disco (DCT) y el modelo de zona cohesiva se utilizan para evaluar el agrietamiento térmico en la mezcla asfáltica. Esta disertación hace una buena contribución a la mejora de los enfoques disponibles para evaluación del potencial de agrietamiento de los pavimentos asfálticos y permite la evaluación de diferentes mezclas en la etapa inicial de selección de materiales. Los resultados de este estudio pueden llevar a desarrollar un nueva parámetro para predecir la susceptibilidad a la fatiga y al agrietamiento térmico de pavimentos flexibles en especificaciones basadas en el rendimiento, lo que se traduce en una mejor calidad de conducción y un ahorro de costos para contratistas y contribuyentes.

AmirHossein Norouzi (2015), El autor menciona en la investigación que desarrollo, que el agrietamiento por fatiga es uno de los problemas complejos que depende del pavimento estructura, propiedades de la mezcla asfáltica y condiciones ambientales. Durante las últimas décadas, muchas agencias de asfalto han realizado importantes investigaciones para medir la fatiga y caracterización de fisuras. Sin embargo, el rendimiento en fatiga sigue siendo difícil de predecir no solo debido a modelos y parámetros, pero también porque este fenómeno en sí no

se comprende bien. El punto clave en la predicción del rendimiento de la fatiga es qué modelo usar y cómo encontrar los parámetros correctos para el modelo seleccionado utilizando el más simple pero el más confiable método de prueba. El módulo es una de las principales propiedades de la mezcla asfáltica que se utiliza para una predicción mecanicista del desempeño de pavimentos asfálticos. La prueba de módulo dinámico es un método común para medir el módulo de la mezcla en función de las frecuencias de carga y temperaturas. A pesar de las numerosas investigaciones que se han realizado para evaluar la mezcla rigidez, todavía es necesario establecer un método de prueba de módulo dinámico práctico que sea compatible con los núcleos de campo que en su mayoría tienen menos de unas pocas pulgadas. Uno de los objetivos de esta disertación es presentar los resultados de un estudio de robustez de dinámica prueba de módulo en modo de tensión indirecta para evaluar los factores que tienen más probabilidades de afectar los resultados finales. Espesor de la muestra, contenido de huecos de aire, longitud del calibre, temperatura de prueba y nivel de deformación horizontal, que son los factores críticos que afectan el módulo dinámico del asfalto concreto, fueron seleccionados para el análisis de rugosidad. Según los hallazgos, el aire vacío se encontró que el contenido es un factor importante que afecta los valores del módulo dinámico. Para investigar la vida de fatiga del pavimento, datos válidos de pruebas de fatiga cíclica que representa verdaderamente el comportamiento de la mezcla que parece necesario además de la rigidez de la mezcla. Con respecto a las pruebas de fatiga por tensión directa, uno de los problemas comunes que influencia en el comportamiento de fatiga de la mezcla es la rotura en los extremos de las probetas asfálticas. Durante las pruebas, se observó que a medida que se cortaba más y más material desde la parte superior y parte inferior de los especímenes compactados giratorios, la probabilidad de falla en el medio del espécimen aumentaba considerablemente. Por lo tanto, la fabricación de probetas más cortas que tengan núcleos y corte de muestras compactadas giratorias más altas puede producir muestras de prueba que tienen más huecos de aire distribuidos uniformemente, de modo que se produzca una falla media dentro de la longitud de calibre del transformador diferencial variable lineal (LVDT) en ensayos de tensión directa. Como parte del estudio, se introdujo a la geometría óptima de la muestra de 100 mm de diámetro y 130 mm de altura, las pruebas experimentales y la simulación numérica. El modelo de daño continuo

viscoelástico simplificado (S-VECD), un continuo modelo basado en la mecánica de daños que se conoce como uno de los modelos efectivos, ha sido aplicado para predecir el rendimiento de mezclas de hormigón asfáltico bajo diferentes cargas condiciones. Además, el criterio de falla por fatiga basado en energía (GR) ha demostrado ser capaz de predecir la vida de fatiga de las mezclas de hormigón asfáltico en diferentes modos de carga, temperaturas y amplitudes de deformación. Esta tesis presenta la aplicación y calibración del análisis de pavimento viscoelástico en capas para problemas críticos (LVECD) programa que se basa tanto en S-VECD como en GR método para evaluar 33 secciones de pavimento desde diferentes ubicaciones dentro de los Estados Unidos, Canadá, Corea del Sur y China. La capacidad del programa LVECD para capturar la iniciación de la grieta, la propagación de la grieta y, los daños en las secciones del pavimento se investigan comparando los resultados de la simulación con las observaciones de campo. En este sentido, se encontró que LVECD predecía eficazmente la fatiga y propagación de grietas en las secciones del pavimento desde que se obtuvo un acuerdo razonable, entre las simulaciones del programa y las observaciones de campo. Finalmente, una predicción del daño en campo, mediante la función de transferencia de grietas que se desarrolló para correlacionar el daño predictivo con el agrietamiento.

Fabio Pereira R. (2015), El autor menciona en la investigación, la degradación por fatiga en los pavimentos depende de las grandes solicitaciones de carga y de las diferentes temperaturas que se encuentran en Brasil, en consecuencia, de ello, el autor estudio en fenómeno de fatiga en laboratorio para una mezcla asfáltica utilizada en campo y evaluar su posible mejora con un uso de ligante modificado con polímero, el autor ensayo a tres temperaturas distintas; 10 C°, 25 C° y 35 C°, preparadas en tres mezclas asfálticas distintas, dos de ellas con un ligante convencional utilizado en un tramo monitorizado CA Lab 50/70 y con ligante modificado con polímero CA Lab 60/85-E. Las mezclas fueron preparadas conforme la metodología Marshall y los insumos fueron caracterizados de acuerdo a los ensayos tradicionales, para todas las mezclas se determinó los parámetros volumétricos, estabilidad flujo, adhesividad, resistencia a la tracción indirecta, Modulo de Resiliencia Total y desempeño a la fatiga por tracción indirecta o tensión controlada, estos tres últimos ensayos fueron realizados a las tres

temperaturas de ensayo. En laboratorio la mezcla con mejor performance fue la modificada con polímero, con un comportamiento mejor a la susceptibilidad térmica y estabilidad de la mezcla, proporcionando mezclas menos susceptibles a variaciones de temperatura y más estables a temperaturas elevadas. Demostrando en laboratorio la superioridad de la CA Lab 60/85-E, con respecto a la no modificada, la rigidez medida con el Modulo Resilente, mostraron poca influencia en la utilización de la mezcla modificada con polímero cuyo comportamiento se diferenció a temperaturas distintas. El desempeño a fatiga mejoro cuando se modificó la mezcla asfáltica con polímero, garantizando un incremento de la vida en servicio para las tres temperaturas analizadas siendo este más evidente para la temperatura de 35 C°.

Vanderlei D. Da Silva (2019), El autor menciona que la utilización de materiales reciclados en la pavimentación es una técnica que posibilidad mejorar los beneficios económicos y ambientales, contribuye a la restauración de las estructuras un aumento de condiciones ideales de nivel de calidad de los pavimentos. El autor evaluó la deformación permanente en cuatro mezclas asfálticas en frio estabilizadas con emulsión asfáltica y asfalto espumado, analizando los resultados obtenidos en 3 procedimientos de ensayos de Flow Number adaptados para mezclas recicladas en frio. Los resultados obtenidos para la RAP_3E2C (única valida con emulsión asfáltica), formaron resultados consistentes por lo observado por Kuchiishi (2019) al estudiar la rigidez de esos materiales, señalan una significativa dependencia de la temperatura y también de las tensiones verticales muy probable que sufran una forma de dispersión del ligante asfáltico en el contenido por el método de extracción de ignición. En altas temperaturas los ligantes asfálticos se tornan más fluidos y sus propiedades mecánicas demuestran que son comandadas por los agregados en su composición en el caso 98% de RAP. Los porcentajes de RAP en la mezcla contribuyen también a encontrar mayor resistencia a la susceptibilidades y deformación permanente. Asimismo realizaron el ensayo de tensión axial de 140 kPa a temperatura de ensayo de 40°C, conforme el método B, dicha mezclas poseen resistencia a la deformación permanente superior a la mezclas estudiadas por los autores citados, que verifican los valores de FN para mezclas estabilizadas con 1.5% de emulsión obteniendo valores de 261 a 981 ciclos siendo estos resultado

obtenidos de menores valores atribuidos a mezclas con cal hidratada y mayores para mezclas con cemento Portland, con todas las muestras se presentó incremento constante de deformación permanente.

Fabri Meroni., Gerardo W. Flintsch, Et Al. (2020), Los autores mencionan, en la investigación que definió una mezcla de control de alto contenido de RAP que cumplía con el VDOT especificaciones actuales. La mezcla, que se denominará 30-Superpave, contenía 30% de RAP en peso de mezcla total, que es el límite superior actual para mezclas de superficie. Una mezcla de control adicional, referido como 45-Superpave, fue diseñado para igualar la estructura agregada y el contenido de aglutinante de 30-Superpave pero con un contenido de RAP del 45% en peso de la mezcla total. Basado en la información de rendimiento (obtenida a través de la prueba de tracción indirecta y la rutina APA prueba) de las mezclas antes mencionadas, se realizaron cambios en la composición de la mezcla. Dos mezclas más fueron diseñadas con una estructura agregada diferente, que no cumplía con la especificación VDOT requisitos, pero cumplió con los umbrales provisionales actuales de DMO [21]. Las nuevas mezclas contenían un 30% y 45% de RAP en peso de la mezcla total y se designaron como 30-BMD y 45-BMD, respectivamente. El contenido óptimo de aglutinante de las dos mezclas se determinó sobre la base de equilibrar el agrietamiento y la formación de surcos en resistencia a la deformación. Los cambios en la composición de la mezcla y el contenido de aglutinante se determinaron con el objetivo de mejorar el rendimiento de las mezclas, incluso si las propiedades finales de la mezcla no satisfacían los requisitos volumétricos.

David Newcomb and Fujie Zhou (2018), Los investigadores manifiestan que un diseño equilibrado para mezclas asfálticas consta de pruebas de rendimiento que se utilizan para establecer una gama de contenido de aglutinante para una determinada fuente de agregado y gradación que evitará fallas por formación de surcos y grietas y que proporcionan una buena durabilidad. El uso de procedimientos de BMD ha sido identificado como de alta prioridad a nivel nacional y por varios DOT estatales como un medio para reducir los riesgos de fallas tempranas de los pavimentos de asfalto. Los investigadores presentan una breve historia del diseño de mezclas asfálticas, los hallazgos del Grupo de Trabajo

de Diseño Balanceado de Mezclas del Grupo de Trabajo de Expertos en Mezclas de la FHWA, NCHRP Synthesis No. 492 (McCarthy et Alabama. 2016), pruebas de rendimiento adecuadas para la implementación en el diseño de mezclas en Minnesota, y un número de prácticas de los estados. El grupo de trabajo BMD identificó tres enfoques. El enfoque de BMD es actualmente utilizado por los DOT estatales para abordar un alto RBR o como un medio para garantizar el rendimiento de mezclas de superficies en carreteras de gran volumen. Si bien las pruebas de celo como APA, HWTT y FN son bastante bien establecidas, las pruebas de agrietamiento que parecen relacionarse con el agrietamiento térmico (DCT, SCB [Minnesota e Illinois] y OT) los autores creen que el mejor enfoque de la DMO para Minnesota utilizará el enfoque volumétrico para identificar un contenido de asfalto que servirá como punto de partida, luego se prepararán mezclas de asfalto con el contenido de asfalto objetivo volumétrico $\pm 0,5$ por ciento. Estas muestras se probarán para determinar su resistencia a la formación de surcos y grietas. El contenido de asfalto objetivo de DMO será: 1) el que pase el criterio de agrietamiento más 0.4 por ciento para asegurar que el contenido de asfalto no cae por debajo del criterio de agrietamiento durante la producción y 2) el que pasa el criterio de ahuellamiento. En el caso de que se cumpla el criterio mínimo de agrietamiento en todos los contenidos de asfalto, el contenido de asfalto DMO será el que esté, como mínimo, un 0,4 por ciento por encima del criterio de agrietamiento. Si el material falla en uno o ambos criterios, el proceso comenzaría de nuevo haciendo ajustes en la combinación de trabajos fórmula, es decir, estructura agregada, grado aglutinante, etc. Si bien sería un buen ejercicio probar todas las pruebas de desempeño discutidas en este capítulo, el tiempo y la financiación no lo permitiría. Por lo tanto, en base a la información de este capítulo y a los autores experiencia con el Proyecto 9-57 de NCHRP, se seleccionaron las siguientes pruebas de agrietamiento para una evaluación adicional: DCT, I-FIT e IDEAL-CT. Estas pruebas son las más relevantes en términos de diseño de mezcla, relación con rendimiento e integración en procesos de QC / QA. Para la formación de roderas, se seleccionó el HWTT ya que es el más omnipresente entre las pruebas de deformación permanente, y tiene un historial de identificar con éxito mezclas asfálticas de buen rendimiento.

Marcio L. Pinto (2013), el autor manifiesta en la investigación tiene como objetivo identificar y estudiar los tipos de materiales y dosificaciones que se utilizan en la fabricación de cemento asfáltico (AC) para trabajos de pavimentación en la región metropolitana de Goiânia y evaluar preliminarmente los parámetros de dosificación Marshall y el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas producidas con diferentes tipos de asfalto (CAP 30/45, CAP 50/70 y asfalto modificado con polímero SBS (60/85) añadidos a la misma composición mineral. La investigación de campo se realizó a través de visitas y entrevistas para recolectar datos de diferentes agentes involucrados en el proceso de uso de mezclas asfálticas. En las pruebas de laboratorio el moldeado de las probetas de las mezclas se realizó mediante la metodología Marshall, que permitió la verificación preliminar de la influencia del tipo de ligante sobre los parámetros de dosificación Marshall (propiedades volumétricas, estabilidad y fluencia). Los procedimientos de laboratorio se desarrollaron solo con mezclas que usaban un 5,0% de asfalto. Estas mezclas no presentaron valores de propiedad volumétricos satisfactorios en comparación con los límites de las normas y recomendaciones de las agencias viales, lo que demostró que se deben realizar estudios con otros contenidos para buscar un contenido ideal. Los resultados medidos para mezclas que utilizan asfalto de tipo AMP fueron, en general, superiores a los medios para las otras mezclas. Sin embargo, para una mejor comparación entre las propiedades de las mezclas que utilizan diferentes asfaltos, se sugiere que se desarrollen más estudios y pruebas.

Paulo R, Borges (2019), el autor menciona en la investigación que se realizó una evaluación comparativa entre los rendimientos respectivos de las mezclas asfálticas, excepto dos métodos capilares Marshall y Superpave, analizando o realizando mediante ensayos mecánicos, también como rendimiento estructural de mezclas asfálticas, cuando se aplica sobre un suelo flexible. Como los rangos de tamaño de partícula seleccionados fueron el rango tamaño de partícula B (capa de unión o aglutinante) y una capa de tamaño de partícula C (arpillera de laminación o capa asfáltica), según especificaciones del Departamento Infraestructura Nacional de Tierras. Introducción a la definición de granulometría y la teoría de Aglutinante asfáltico para cada método de dosificación, fueron constituidos por cuerpos de prueba, realizando pruebas de laboratorio para determinar dos

parámetros analizada la mecánica de las mezclas asfálticas. Pruebas de estabilidad, resistencia a la compresión diametral, módulo de resistencia, fatiga y compresión uniaxial estática (fluencia estática), comparando los resultados entre los métodos de dosificación utilizados por la investigación, así las propiedades mecánicas, usado o programa informático Elsym5 para análisis de la estructura. El pavimento curado se sumergió después de tres ventiscas de carga (80 kN, 98 kN y 118 kN) y después de tres niveles de presión de inflado de neumáticos (563 kPa, 633 kPa y 703kPa). Los resultados obtenidos indican que la variación del método de dosificación cambia el comportamiento mecánico de las carrocerías a prueba de mezclas asfálticas y también el rendimiento estructural de pavimento flexible. Es de destacar que los métodos de la dosificación realizada en el laboratorio confieren características únicas al rendimiento de mezclas asfálticas, o que afecte los resultados del análisis estructura del pavimento.

Reyhaneh Rahbar-Rastegar (2017), el investigador menciona que el agrietamiento en los pavimentos de asfalto es una de las fallas más comunes y críticas del pavimento. Las grietas permiten que el agua penetre desde la superficie hasta las capas subyacentes, lo que resulta en una vida útil del pavimento y mala calidad de conducción. Hay varios factores que afectan el agrietamiento de las mezclas asfálticas, incluidas las propiedades de los componentes asfálticos, diseño de la mezcla factores, tiempo de carga y modo de carga, temperatura, estado de estrés y envejecimiento. Mientras que varios de los investigadores han realizado estudios que investigan el agrietamiento de mezclas asfálticas, la eficacia, los parámetros no se comprenden bien para permitir a los ingenieros diseñar y construir más pavimentos resistentes a las fisuras. El investigador con las tesis proporciona algunas ideas adicionales sobre los efectos de propiedades de los componentes y condición de envejecimiento en el agrietamiento del asfalto. La susceptibilidad al agrietamiento del asfalto de mezcla en caliente (HMA) estos se evalúan a través de pruebas experimentales y modelado numérico en mezclas producidas en etapa de diseño (laboratorio) o producción (planta). Varios criterios y se evalúan los enfoques para la predicción del agrietamiento en el ligante asfáltico y la mezcla asfáltica. y se discute su correlación. Se simulan diferentes niveles de envejecimiento en laboratorio, y los efectos del envejecimiento en horno a largo plazo (LTOA) sobre los parámetros viscoelásticos lineales, fatiga y se exploran

las características de fractura de las mezclas asfálticas. La prueba de fatiga por tracción uniaxial basado en un enfoque de daño continuo viscoelástico simplificado (SVECD) se lleva a cabo para caracterizar el comportamiento de fatiga y flexión semicircular (SCB), tensión compacta en forma de disco (DCT) y el modelo de zona cohesiva se utilizan para evaluar el agrietamiento térmico la mezcla asfáltica. Esta disertación realiza una contribución a la mejora de los enfoques disponibles para evaluación del potencial de agrietamiento de los pavimentos asfálticos y permite la evaluación de diferentes mezclas en la etapa inicial de selección de materiales. Los resultados de este estudio pueden llevar a desarrollar un nuevo parámetro para predecir la susceptibilidad a la fatiga y al agrietamiento térmico de pavimentos flexibles en especificaciones basadas en el rendimiento, lo que se traduce en una mejor calidad de conducción y un ahorro de costos para contratistas y contribuyentes.

Estrada E., Victor (2017), El autor realiza una investigación a nivel de comparación de una mezcla asfáltica convencional PEN 85/100 Plus y otra con el mismo PEN pero modificada con polímero SBS PG 70-28, Para efectos de investigación los diseños para ambos tipos de mezclas asfálticas, se realizó teniendo en cuenta las mismas consideraciones, utilizando los mismos agregados y la misma gradación para ambas mezclas asfálticas, teniendo como única variable el tipo de ligante asfáltico utilizado para los diseños de mezcla, posteriormente fueron moldeados los cuerpos de prueba para los ensayos de desempeño teniendo en consideración el contenido óptimo de las mezclas asfálticas estudiadas. El autor demostró que la mezcla asfáltica con polímero SBS PG 70 -28 nos ofrecerá un mayor nivel de estabilidad, ya que el valor de estabilidad que se obtuvo en la mezcla asfáltica modificada con polímero SBS PG 70 -28 (estabilidad igual a 2047 kgf) es mucho más elevado que el valor de estabilidad de la mezcla asfáltica convencional PEN 85/100 plus (estabilidad igual a 1382 kgf,), lo que demuestra una mayor cohesión y adhesividad de la mezcla asfáltica modificada con polímero SBS PG 70 -28, asimismo en cuanto a los valores de ahuellamiento medido en el ensayo de rueda de Hamburgo a los 20,000 ciclos de pasadas se registró 3.79 mm promedio, en cuanto a la mezcla convencional sin modificar no llego a culminar el ensayo ya que alcanzo 12,00 mm máximo de ahuellamiento, asimismo para la fatiga con polímero SBS PG 70 -28, se obtuvieron valores 3 244 490 ciclos a aplicaciones

de carga, en relación a la mezcla convencional solo alcanzo 186 223 ciclos o aplicaciones de carga.

Bjorn Birgisson & Gabriele Tebaldi, Et Al (2011), los autores llevan a cabo una investigación de laboratorio para estimar la respuesta de fisuración macroscópica de las mezclas asfálticas modificadas con polímeros de estireno butadieno estireno (SBS) mediante el análisis de la distribución de deformación localizada dentro de la microestructura del material. En el laboratorio se produjeron cinco mezclas asfálticas compuestas por la misma gradación de agregados, pero diferentes ligantes asfálticos modificados con SBS. Se empleó un sistema basado en la correlación de imágenes digitales (DIC) desarrollado internamente para obtener mapas de deformación de campo completo en 2D de las muestras durante la carga de tracción. Se observaron distribuciones de deformación a partir de tres configuraciones de prueba diferentes, a saber, la prueba de tracción indirecta (IDT), la prueba de flexión semicircular (SCB) y la prueba de flexión en tres puntos (3PB). Los comportamientos de agrietamiento de las mezclas se evaluaron utilizando un modelo basado en la mecánica de fractura viscoelástica titulado HMA Fracture Mechanics. Los resultados muestran claramente el efecto beneficioso del modificador de polímero SBS en la redistribución de la tensión dentro de la masilla.

Mohammadvoriya Khordehbinan, Et Al (2017), Los autores manifiestan que, la producción de mezclas asfálticas modificadas otorga un excelente desempeño adecuado en alta temperatura y a su vez ha estado siempre bajo la atención de los investigadores. Uno de estos modificadores es el polímero de estireno butadieno estireno (SBS). Dado que la aplicación de polímero SBS en mezclas bituminosas y asfálticas no tiene el rendimiento de campo esperado debido a la separación de fases de betún y polímero, oxidación y envejecimiento, el presente estudio intenta no solo mejorar los defectos del polímero, sino también analizar su alto rendimiento a la temperatura mediante el uso de nano-SiO₂ y polímero SBS en la modificación del betún. De acuerdo con los resultados del estudio, agregar nano-SiO₂ y polímero SBS con 3 y 4.5 por ciento en peso de betún, respectivamente, al betún en la mezcla asfáltica conduce a un aumento del número de flujo en la prueba de fluencia dinámica a 50°C por 399 veces y a 60° C por 1,015 veces en

comparación con la mezcla asfáltica sin modificar. Esto, a su vez, indica la mejora considerable del rendimiento de la mezcla asfáltica a alta temperatura.

I.Amin, R. Alabasey, A. Azam. Et Al (2016), Los autores analizan que el asfalto tradicional se vuelve un material frágil y quebradizo a bajas temperaturas, por lo que puede agrietarse fácilmente bajo cargas de tráfico repetidas o por cambios térmicos. En cambio, a alta temperatura, es un material blando que pueden formar surcos (ahuellamientos) bajo carga de tráfico. Además, el asfalto no es capaz de hacer frente al aumento de los volúmenes de tráfico/carga en las carreteras. Asimismo, el uso del Asfalto Modificado con Polímeros (PMA) en mezclas asfálticas en caliente puede mejorar el rendimiento del pavimento y puede aumentar la vida útil de la carretera. En este trabajo se evaluó la caracterización de mezclas asfálticas en caliente (HMA) modificadas con el PMA (SUPERPLAST – COPOLIMERO DE NATURALEZA PLASTOMERICA) y en comparación con las mezclas convencionales. Se realizó una prueba de laboratorio exhaustiva en Mansoura Laboratorio Universitario de Ingeniería de Carreteras y Aeropuertos (H&AE-LAB). Las mezclas asfálticas fueron diseñadas por Marshall y el porcentaje de PMA osciló entre 0 y 6% en peso del ligante. El programa de pruebas de laboratorio incluye las pruebas de penetración, pruebas de punto de reblandecimiento, pruebas de viscosímetro rotacional que fue realizado modificada con en el PMA. Para las mezclas asfálticas, los programas experimentales son la resistencia a la tracción indirecta (IDT) y el porcentaje de pérdida de estabilidad. Los autores mostraron los siguientes resultados; que la mezcla asfáltica con 4% de porcentaje de PMA tuvo la mayor Estabilidad Marshall y densidad aparente de la mezcla. En general, los hallazgos de este estudio demostraron que el uso de PMA en las mezclas asfálticas disminuye la formación de surcos (ahuellamientos) en el pavimento y aumentar la vida útil del pavimento.

Duijia Zhao. Et Al (2009), Los autores realizan un estudio completo para evaluar las características de los ligantes y mezclas asfálticas modificadas con polímeros usando las pruebas convencional y SuperPave. Los polímeros investigados incluyeron estireno-butadieno-estireno (SBS), estireno-butadieno-caucho (SBR) y polímeros complejos (o polímero C). Se muestra que las características de los

ligantes y mezclas de asfalto modificado con polímeros pueden variar con el tipo de polímero, la dosis de polímero, la fuente de asfalto, el tipo de agregado y el tipo de mezcla. A medida que aumenta la dosis de polímero, las características a temperaturas bajas y altas del ligante asfáltico mejoran, la rigidez a la fluencia disminuye, el valor “m” puede aumentar y las características de envejecimiento mejoran. El uso de un polímero puede mejorar la estabilidad dinámica de la mezcla asfáltica y mejora en la resistencia al ahuellamiento y así medir mejor la resistencia del surco (ahuellamiento). La presencia de un polímero también puede mejorar el comportamiento de flexión de la mezcla asfáltica a bajas temperaturas. Los autores, concluyen que la mezcla AC-13 puede generar un mejor desempeño del pavimento que la mezcla AC-16. El polímero C ha mostrado resultados prometedores en relación al polímero SBS y SBR en la mejora de las características de la mezcla asfáltica en caliente.

2.3. Estructura teórica y científica que sustenta el estudio

2.3.1. Cemento Asfáltico

El asfalto se define como un material de color oscuro, que puede tener consistencia líquida, semisólida o sólida, compuesto principalmente por hidrocarburos. Puede encontrarse en yacimientos naturales o como un producto de la refinación del petróleo; sus cualidades aglutinantes y propiedades fisicoquímicas lo hacen apto para un sinnúmero de aplicaciones. El 80 % de la producción mundial del asfalto de refinería se utiliza para la construcción de vías. Adicionalmente, es un material altamente impermeable, adherente y cohesivo, capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes. Es más, a pesar de que el asfalto fluctúa tan solo entre el 4.5 y el 7.5% de la composición del pavimento, ningún otro material garantiza en mayor grado la satisfacción simultánea y económica de estas funciones, al mismo tiempo que proporciona una estructura de pavimentos con características flexibles que permiten cierto grado de acomodo, sin fisurarse en eventuales movimientos de las capas subyacentes. En base a las características fisicoquímicas y coloidales, este tipo de ligante aporta a la vía propiedades viscosas a altas temperaturas y elásticas a bajas temperaturas, en suma, el asfalto es el encargado de unir el agregado mineral de diferentes tamaños, que hace las veces del esqueleto, dando confort al usuario (Garson, et al, 2005, p. 2).

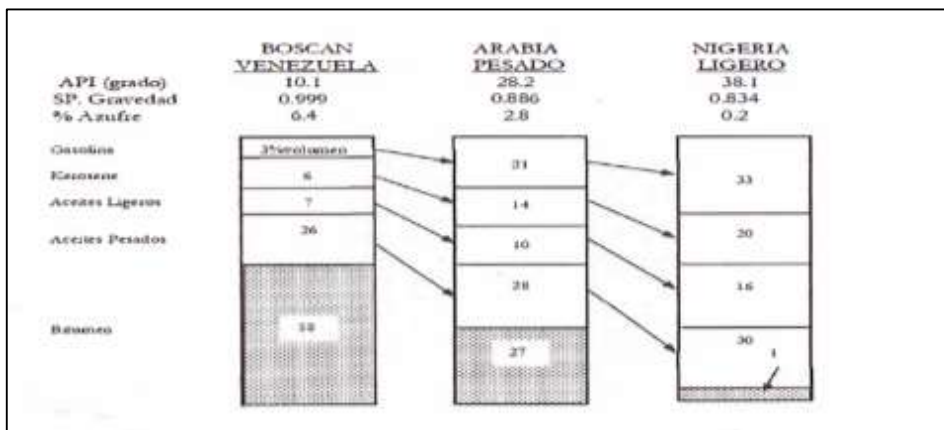
2.3.2. Procedimiento de obtención del asfalto.

El crudo de petróleo varía su composición dependiendo de la fuente, produciendo diferentes tipos y cantidades de cemento asfáltico residual y otras fracciones destilables (Minaya y Ordoñez, 2001, p.63). El crudo de petróleo puede clasificarse arbitrariamente de acuerdo con su gravedad API (American Petroleum Institute). La gravedad API está en función de la densidad del material a 60° F y se obtiene de la siguiente expresión:

La gravedad API del agua es 10. El asfalto, material más pesado, tiene una gravedad API entre 5 y 10, mientras que el API más liviano de la gasolina es alrededor de 55. Los procesos de refinación para la obtención de asfaltos dependen de las características del crudo y el rendimiento del asfalto que presentan. Los crudos de petróleo pesados con API menor a 25 resultan en mayores porcentajes de cementos asfálticos, mientras que los petróleos livianos con API mayor a 25 arrojan menores porcentajes de asfaltos. La siguiente ilustración presenta los porcentajes de asfalto resultante de crudos típicos (Minaya y Ordoñez, 2001, p.64).

Figura 01.

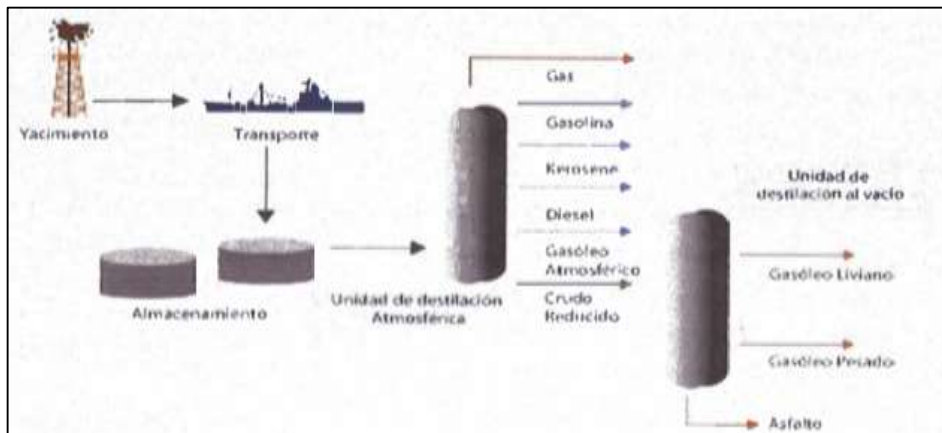
Rendimiento del cemento asfáltico residual.



Fuente: Ensayos para pavimentos Volumen I. (2008)

Figura 02.

Obtención del asfalto.



Fuente: Pagina Web Repsol Perú. (2009)

Para crudos muy pesados de altos rendimientos de asfalto, basta una etapa de destilación al vacío. Para crudos de rendimientos intermedios de asfalto serán necesarios dos etapas de destilación: una a presión atmosférica y otra al vacío. Para crudos muy livianos y de bajo rendimiento de asfalto se requiere una etapa adicional a las dos anteriores, que es la etapa de extracción. La destilación del crudo de petróleo consiste en el calentamiento a más o menos 343°C, vaporizándose parcialmente sus componentes. Luego, el material remanente es transferido a una torre de destilación donde los componentes ligeros se vaporizan, ascendiendo hasta lo más alto, luego de enfriarse y condensarse son sacados fuera. A diferentes alturas en la torre, las fracciones logran su punto de ebullición y luego, con la disminución de la temperatura, se condensa en recipientes dentro de la torre. El componente intermedio de la torre se saca y trata para producir kerosene y diésel. El residuo de esta destilación es usualmente colocado dentro de una unidad de destilación al vacío donde se producen los aceites pesados.

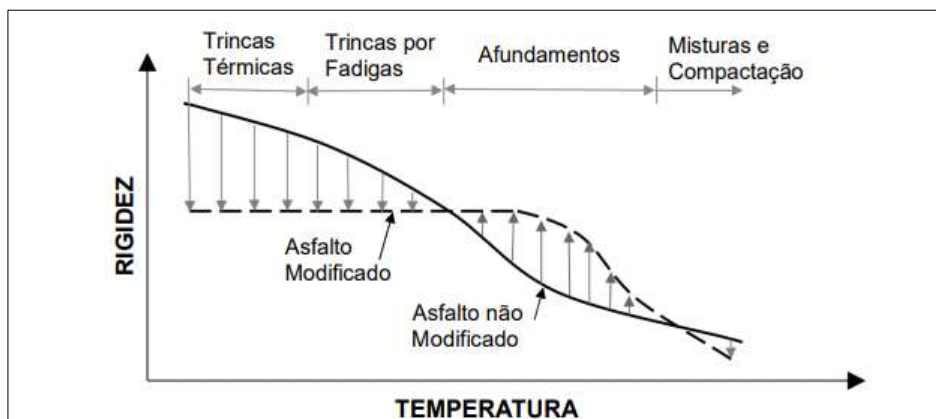
2.3.3. Asfaltos modificados

La idea de utilizar un asfalto modificado con polímero es potenciar las propiedades reológicas y adaptar el uso del ligante en pavimentos cuyas exigencias de carga y clima son más intensos, tal como se ve en la figura N°03. El uso del polímero hace que el asfalto sea más elástica y más resistente al proceso de oxidación con una menor susceptibilidad térmica y contribuye a la adherencia con el agregado pétreo (Bringel, 2007; Silva et al., 2002).

En la figura N°03, es posible ver un esquema aproximado del comportamiento del ligante modificado con polímero, donde la línea continua hace referencia al ligante puro y la línea discontinua al ligante modificado, ahora, existe una tendencia en cuando al ligante modificado dado a temperaturas más bajas y mayor rigidez, ayudan a reducir el origen térmico contribuyendo a la fatiga, así como el aumento de la resistencia al ahuellamiento a temperaturas más elevadas (Behnood; Gharehveran, 2019).

Figura 03.

Comportamiento esperado del ligante modificado con polímero SBS.



Fuente: Adaptado de Behnood; Gharehveran. (2019)

2.3.4. Generalidades sobre el copolímero SBS

El SBS (estireno, butadieno, estireno), es un polímero de respuesta elastómera, es decir que tienen la característica que después de ser estirados regresan a su forma original. Los elastómeros están considerados por cadenas muy largas de monómeros que puede ser tanto lineales como ramificadas y que estas se entrelazan tridimensionalmente, la habilidad elástica de estos materiales es otorgada por que las cadenas tienen la propiedad de cambiar su posición por sí mismas y así homogenizar y distribuir los esfuerzos que se le aplican.

Los polímeros más utilizados en las modificaciones de asfaltos son los de tipo Elastómeros, que dan respuesta elástica (SBS, Isopreno, Caucho) y Plastómeros que rigidizan el asfalto dándole mayor resistencia y en consecuencia no son deformables elásticamente (PVC, EVA).

Figura 04.

Representación esquemática de una estructura de un elastómero termoplástico.



Fuente: Hunter; Self; Read (2015).

En general, los elastómeros termoplásticos obtienen su resistencia y elasticidad a través del entrecruzamiento de moléculas, configuradas por formación de una red tridimensional de reticulación que se puede lograr mediante asociación de bloques finales de poliestireno en dominios separados para formar zonas semicristalinas, proporcionando enlaces cruzados con cadenas de butadieno. Los enlaces cruzados se forman cerca de la temperatura ambiente, pero se rompen a altas temperaturas, solo para volver a su origen nuevamente al enfriarse, siendo entonces una red tridimensional reversible (Hunter; Self; Read, 2015).

Una de las tecnologías poliméricas más satisfactorias en la modificación del ligante asfáltico a través de la incorporación del copolímero SBS, destaca las características proporcionadas a una combinación con mejora en la adhesividad del agregado y elasticidad obtenida debido a su estructura química interactuando con el bloque butadieno y con los maltenos.

El progreso de las características de CAP también cubre el aumento de la resistencia a la oxidación y, en consecuencia, la reducción de envejecimiento. El polímero SBS generalmente consta de 20 a 30% (m/m) de estireno, con un contenido favorable, cuando este valor supere el 30%, disminuye la compatibilidad entre el SBS y el ligante asfáltico, y seguidamente se tiene dificultades sobre la dispersión y la inestabilidad en el almacenamiento (Ceratti; Bernucci; Soares, 2015).

2.3.5. Propiedades de mezcla asfáltica en caliente.

Según Maila, J. (2013). Las buenas mezclas asfálticas en caliente trabajan bien debido a que son diseñadas, producidas y colocadas de tal manera que se logra

obtener las propiedades deseadas. Hay varias propiedades que contribuyen a la buena calidad de pavimentos de mezclas en caliente. Estas incluyen estabilidad, durabilidad, flexibilidad, resistencia a la fatiga, resistencia al daño por humedad o impermeabilidad, resistencia al deslizamiento y trabajabilidad.

a) Estabilidad: La estabilidad de una mezcla es la facultad de resistir deformaciones y desplazamiento bajo acción de cargas de tráfico. Un pavimento firme tiene la capacidad y resiliencia de conservar su forma bajo repeticiones de carga, en consecuencia, un pavimento inestable presenta en corto plazo deformaciones como ahuellamientos, ondulaciones y demás señales que indican cambios en la mezcla. Los requerimientos de estabilidad solo pueden instaurar después de un análisis completo del flujo de vehículos, las especificaciones para la estabilidad de un pavimento dependen del tráfico esperado. Se debe entender que valores altos de estabilidad conllevan a producir pavimentos demasiados rígidos y, por lo tanto, con poca duración. La mencionada propiedad está sujeta a la fricción interna y de la cohesión. La fricción interna (fricción entre las partículas) depende mucho de la textura superficial, de la granulometría, de la forma y tamaño de la partícula.

Asimismo, la cohesión depende del óptimo contenido del asfalto. Las mencionadas características dependen una de la otra, ya que lo que altera a una repercute en la otra.

b) Durabilidad: El tiempo de vida de un pavimento depende de muchos factores, pero primordialmente de la durabilidad. Es importante resaltar que un pavimento (principalmente la carpeta asfáltica), queda expuesto a diferentes agresiones externas que perjudican su duración siendo éstas la abrasión producida por el tráfico, la radiación solar, la oxidación del ligante producida por el aire, el agua o el hielo, también los aceites y combustibles, produciendo así la separación de la película o recubrimiento de asfalto y la disgregación del agregado. Generalmente, la durabilidad de una mezcla asfáltica puede ser optimizada en tres formas. Estas son: empleando la mayor cantidad de asfalto, utilizando una gradación densa de agregado que resista a la segregación, y diseñando y compactando la mezcla asfáltica para obtener una máxima impermeabilidad.

c) Flexibilidad: La flexibilidad es una propiedad muy deseable en todos los pavimentos, ya que la densidad de la subrasante es poco uniforme debido a que algunas partes del pavimento tienden a comprimirse y expandirse por el suelo y tienden a asentarse por causa del tráfico. Lo que se busca en la mayoría de mezclas es la capacidad de poder resistir a diversos tipos de asentamientos sin que lleguen a quebrarse. La mezcla

asfáltica en caliente con granulometría abierta de alto porcentaje de asfalto es, por lo general, mucho más flexible que una mezcla asfáltica en caliente con granulometría densa y de bajo contenido de asfalto. Por lo general todos los requerimientos de flexibilidad entran en disidencia con los requerimientos evaluados de estabilidad, y en tal sentido lo que se busca es generar un equilibrio en ambos casos.

d) Resistencia a la fatiga: La resistencia a la fatiga de una mezcla asfáltica en caliente es la resistencia a la flexión que se refleja en la acción de las repeticiones de cargas bajo la acción del tráfico vehicular. Por lo general se ha demostrado en diversas investigaciones que, los vacíos (en relación con el porcentaje de asfalto) y la viscosidad del asfalto, producen un efecto notablemente sobre el comportamiento a la fatiga. Para el buen comportamiento de la fatiga en la mezcla asfáltica en caliente, se tiene en consideración que afecta la compactación sobre los vacíos de la mezcla, asimismo, el tiempo de servicio de la mezcla asfáltica en caliente con una adecuada relación de vacíos y porcentaje de asfalto disminuye la fatiga. En consecuencia, una mezcla asfáltica en caliente que contiene asfalto envejecido y endurecido posee menos resistencia a la fatiga.

e) Resistencia al daño por humedad o impermeabilidad: La impermeabilidad no nace de la capa superior del pavimento sino desde sus capas interiores. Esta propiedad tiene como función evitar el paso del agua o aire a las mezclas asfálticas, siendo sus principales colaboradores: el contenido de vacíos, ya que éste es un gran indicador de cuan susceptible puede llegar a ser la mezcla asfáltica y el contenido de asfalto. Cuando esta impermeabilidad se va perdiendo, debido a la gran cantidad de contenido de vacíos, aparecen carencias estructurales en el pavimento producidas por la oxidación y adherencia del asfalto, y el drenaje del pavimento.

f) Resistencia al deslizamiento: La resistencia al deslizamiento es la propiedad y destreza que tiene la superficie de un pavimento de reducir el deslizamiento de las llantas de los vehículos circulantes, esto cuando el pavimento se encuentra saturado de agua. Para la obtención de la buena resistencia al deslizamiento, las llantas de los vehículos deben ser capaces de mantener un óptimo contacto con todas las partículas del agregado mineral, en vez de deslizarse sobre la película de agua de la superficie del pavimento lo que se conoce como el hidropelaje.

Se debe tener en cuenta que las superficies rugosas y ásperas tienen mayor grado de adherencia con las llantas de los vehículos; para esto, los agregados pétreos deben de ser resistentes al desgaste bajo tránsito. Asimismo, muy importante es

la exudación del asfalto (inadecuada cantidad de vacíos en la mezcla asfáltica en caliente) ya que proporciona poca resistencia al deslizamiento.

g) **Trabajabilidad:** Las mezclas asfálticas en caliente deben de ser maniobrables, trabajables, flexibles; esto se refiere a la afabilidad en el proceso de mezclado, colocación y compactación. Depende bastante de las características del agregado pétreo, la granulometría a utilizar, relleno mineral a considerar (cemento portland o cal), contenido y viscosidad del asfalto. Las mezclas con un esqueleto mineral más grueso, por lo general poseen una tendencia a segregarse durante el proceso de mezclado y por lo general se dificulta en compactarse. El contenido alto de relleno mineral también ocasiona una mala trabajabilidad de la mezcla. Puede ocasionar que la mezcla se vuelva muy viscosa, dificultando el proceso de compactación, esto puede ser a la elección errónea del relleno mineral a considerar.

2.3.6. Pavimento de concreto asfáltico en caliente.

Según las Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG-2013 (Manual del Ministerio de Transporte y Comunicaciones, EG-2013), referido básicamente a la fabricación y colocación de una o más capas de mezcla asfáltica en caliente.

Materiales

a) **Requerimiento para los agregados minerales gruesos.**

Cumplimiento de requerimiento en concordancia a lo establecido en la EG-2013, se detalla en la tabla 01.

Tabla 01.

Agregados gruesos.

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

Fuente: Adaptado de las especificaciones técnicas generales – EG (2013)

b) Requerimiento para Agregados minerales finos.

Cumplimiento de requerimiento para agregados finos en concordancia a lo establecido en las EG-2013, se detalla en la tabla 02.

Tabla 02.

Agregados finos.

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

Fuente: Adaptado de las especificaciones técnicas generales – EG (2013)

c) Relleno mineral o Filler.

Los materiales que pueden utilizarse como filler pueden ser cemento, cal hidratada, polvo de roca, polvo de escoria, ceniza fina o loes.

En la presente tesis se considera al filler como material recuperado de la maquina mezcladora de asfalto y agregado, complementando el esqueleto granular.

d) Gradación de la mezcla asfáltica en caliente.

Los usos granulométricos especificados en la EG-2013, deberán responder al requerimiento los cuales se muestra en la Tabla 04. Asimismo, dependerá del nivel de tráfico y otras variables su elección. Pueden emplearse también gradaciones especificadas en la ASTM D 3515 indicadas en la Tabla 05 e Instituto del Asfalto.

Tabla 03.
Requerimientos para usos granulométricos.

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

Fuente: Adaptado de las especificaciones técnicas generales – EG (2013).

Tabla 04.
Requerimientos para gradación de mezclas.

Abertura de malla	Mezcla cerrada								
	Tamaño máximo nominal del agregado								
	2 in	1 1/2 in	1 in	3/4 in	1/2 in	3/8 in	N° 4	N° 8	N° 16
	(50 mm)	(37,5 mm)	(25,0 mm)	(19,0 mm)	(12,5 mm)	(9,5 mm)	(4,75 mm)	(2,36 mm)	(1,18 mm)
2 1/2"(63mm)	100								
2"(50mm)	90 - 100	100							
1 1/2"(37,5mm)		100	100						
1"(25,0mm)	60 - 80		90 - 100	100					
3/4"(19,0mm)		56 - 80		100	100				
1/2"(12,5mm)	35 - 65		56 - 80		100	100			
3/8"(9,5mm)			...	56 - 80	...	100			
N°4(4,75mm)	17- 47	23 - 53	29 - 59	35 - 65	44 - 74	55 - 85	100		100
N°8(2,36mm)	10. - 36	15 - 41	19 - 45	23 - 49	28 - 58	32 - 67	100		95-100
N°16(1,18mm)							40 - 80		85-100
N°30(600µm)							35 - 65		70-95
N°50(300µm)	3. - 15	4. - 16	5. - 17	5. - 19	5. - 21	7. - 23	7. - 40		45-75
N°100(150µm)							3. - 20		20-40
N°200 (75µm)	0 - 5	0 - 6	1. - 7	2. - 8	2. - 10	2. - 10	2. - 10		9-20

Fuente: Adaptado de ASTM D – 3515.

e) Requerimiento de cemento asfáltico

El Cemento Asfáltico cumplirá lo requerido en la EG-2013, de acuerdo a la ubicación del proyecto (temperatura y zona).

Tabla 05.

Selección del tipo de asfalto.

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

Fuente: Adaptado de ASTM D – 3515.

Tabla 06.

Especificaciones del cemento asfáltico clasificado por penetración.

Tipo		Grado de Penetración									
Grado	Ensayo	PEN		PEN		PEN		PEN		PEN	
		40-50	60-70	85-100	120-150	200-300	min	máx.	min	máx.	min

Pruebas sobre el Material Bituminoso

Penetración a 25°C, 100g, 5s, 0.1mm	MTC E 304	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Punto de inflamación, c°	MTC E 312	232		232		232		218		177	
Ductilidad, 25°C, 5cm/min, cm	MTC E 306	100		100		100		100		100	
Solubilidad en Tricloro-etileno, %	MTC E 302	99,0		99,0		99,0		99,0		99,0	
Índice de Penetración (Susceptibilidad Térmica)	MTC E 304	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1
Ensayo de la Mancha (Olienses)											
Solvente Nafta - Estándar		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Solvente Nafta - Xileno, %Xileno	AASHTO M20	Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Solvente Heptano - Xileno, % Xileno		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	

**Pruebas sobre la Película Delgada a 163°C,
3.2mm, 5h**

	ASTM D										
Pérdida de masa, %	1754	0,8		0,8		1		1.3		1.5	
Penetración retenida después	MTC E 304	55+		52+		47+		42+		37+	

del ensayo de película
fina, %

Ductilidad del residuo a 25°C, 5cm/min, cm	MTC E 306	50	75	100	100
--	--------------	----	----	-----	-----

Fuente: Adaptado de las especificaciones técnicas generales EG (2013).

f) Requerimiento para mezcla asfáltica en caliente

Todos los requerimientos de calidad, estarán en función con las exigencias que se indican en la EG-2013, las cuales se muestran en las Tablas 08, 09 y 10, según corresponda al tipo de mezcla que se produzca, de acuerdo al diseño del proyecto.

Tabla 07.

Mezcla del concreto bituminoso.

Parámetro de Diseño	Clase de Mezcla		
	A	B	C
Marshall MTC E 504			
1. Compactación, numero de golpes por lado	75	50	35
	8,15 kN	5,44 kN	4,53 kN
2. Estabilidad (mínimo)	(831 kg)	(555 kg)	(462 kg)
3. Flujo 0,01 (0,25 mm)	8. - 14	8. - 16	8. - 20
4. Porcentaje de vacíos con aire (MTC E 505)	3. - 5	3. - 5	3. - 5
5. Vacíos en el agregado mineral		Ver Tabla 2.15	
Inmersión - Compresión (MTC E 518)			
1. Resistencia a la compresión Mpa min.	2,1	2,1	1,4
2. Resistencia retenida % (min)	75	75	75
Relación Polvo – Asfalto (2)	0,6-1,3	0,6-1,3	0,6-1,3
Relación Estabilidad/Flujo (kg/cm) (3)		1.700-4.000	
Resistencia conservada en la prueba de tracción indirecta AASHTO T 283		80 min.	

Fuente: Adaptado de las especificaciones técnicas generales EG (2013).

Tabla 08.
Requerimiento para adherencia.

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		≤ 3.000	> 3.000(*)
Adherencia (Agregado grueso)	MTC E 517	+95	-
Adherencia (Agregado fino)	MTC E 220	4 min. (**)	-
Adherencia (mezcla)	MTC E 521	-	+95
Resistencia conservada en la prueba de tracción indirecta	AASHTO T 283	-	80 min.

Fuente: Adaptado de las especificaciones técnicas generales EG (2013).

Tabla 09.
Vacíos mínimos en el agregado mineral.

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

Fuente: Adaptado de las especificaciones técnicas generales EG (2013).

g) Requerimiento mezcla asfáltica en caliente modificada con polímero

El requerimiento se encuentra sujeta a las EG-2013.

Tabla 10.

Requerimiento de cemento asfáltico modificado con polímeros.

Características		TIPO I (*)							
		I-A		I-B		I-C		I-D	
		min	max.	min	max.	min	max.	min	max.
Pruebas sobre el producto original									
Penetración, 25 °C.	MTC E-304	100	150	75	100	50	75	40	75
Viscosidad absoluta 60 °C, poise	MTC E-308	1.25		2.5		5		5	
Punto de inflación COC C°	MTC E-303		3		3		3		3
Solubilidad en tricloroetileno; % (**)	MTC E-302	232		232		232		232	

Separación, diferencia entre punto de ablandamiento (anillo y bola) de porción superior e inferior; °C	MTC E-307	99	99	99	99	
Recuperación elástica, 25 °C%	ASTM D 6084		2.2	2.2	2.2	2.2
Recuperación elástica 5°C%	ASTM D 6084	60	60	60	60	
Punto de Ablandamiento (anillo y bola) %	MTC E-307	50				
Pruebas en el residuo de película fina y rotatoria (1)		45	50	60	60	
Recuperación elástica 25 °C, 10 cm de elongación; %	ASTM D 6084	60	60	60	60	
Penetración 4°C.200g. 60s; dmm	MTC E-304	20	15	13	10	
Separación, diferencia entre punto de ablandamiento (anillo y bola) de porción superior e inferior; °C	MTC E-307	<=10	<=10	<=10	<=10	

Fuente: Adaptado de las especificaciones técnicas generales EG (2013).

Tabla 11.

Requerimiento de cemento asfáltico modificado con polímeros.

Características		TIPO II (*)							
		II-A		II-B		II-C		II-D	
		min	max.	min	max.	min	max.	min	max.
Pruebas sobre el producto original									
Penetración, 25 °C. 100. 5s, dmm	MTC E-304	100		70		85		80	
Viscosidad absoluta 60 °C 1 s-/pise	MTC E-308	800		1600		800		1600	
Viscosidad 135°C, C;cSt	MTC E-310	300		300		300		300	
Ductilidad 4°C. 5cm/min; cm	MTC E-306	50		50		25		25	
Punto de inflamación, COC, C°	MTC E-303	232		232		232		232	
Recuperación elástica, 25°C; %	ASTM D 6084	50		50		50		50	
Separación, diferencia entre punto de ablandamiento (anillo y bola) de porción superior e inferior; °C	MTC E-319		3		3		3		3
Punto de Ablandamiento (anillo y bola) %	MTC E-307	45		50		50		50	
Pruebas en el residuo de película fina y rotatoria (1)									
Ductilidad 4°C- 5cm/min; cm	MTC E-306	25		25		10		10	
Viscosidad, 60°C 1 s-/pise	MTC-308		4000		8000		4000		8000

Fuente: Adaptado de las especificaciones técnicas generales EG (2013).

Tabla 12.*Requerimiento de cemento asfáltico modificado con polímeros.*

Características		TIPO IV (*)							
		IV-A		IV-B		IV-C		IV-D	
		min	max.	min	max.	min	max.	min	max.
Pruebas sobre el producto original									
Penetración, 25 °C.	MTC								
100. 5s, dmm	E-304	90		75		65		50	
Viscosidad absoluta 60 °C, pise	MTC								
	E-308	1.25		4.000		2.500		6.000	
Viscosidad 135 °C. cSt	MTC								
	E-310		3.000		3.000				3.000
Punto de inflamación	MTC								
COC C°	E-303	232		232		232		232	
Solubilidad en tricloroetileno; % (**)	MTC								
	E-302	99		99		99		99	
Separación, diferencia entre punto de ablandamiento (anillo y bola) de porción superior e inferior; °C	MTC								
	E-307								
	MTC								
Recuperación elástica, 25 °C%	E-319		2.2		2.2		2.2		2.2
	ASTM								
	D								
Recuperación elástica 5°C%	6084	60		60		60		60	
	ASTM								
Punto de Ablandamiento (anillo y bola) %	D								
	6084	50							
Pruebas en el residuo de película fina y rotatoria (1)	MTC								
	E-307	50		50		50		50	
Recuperación elástica 25 °C, 10 cm de elongación; %	ASTM								
	D								
Penetración 4°C.200g. 60s; dmm	6084	60		70		60		70	
	MTC								
Separación, diferencia entre punto de ablandamiento (anillo y bola) de porción superior e inferior; °C	E-304	20		20		15		15	
	MTC								
	E-307	<=10		<=10		<=10		<=10	

Fuente: Adaptado de las especificaciones técnicas generales EG (2013).

2.3.7. Método Marshall

Paul Garnica A, et al. (2004). El concepto del método Marshall para diseño de mezclas de pavimentación fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. El cuerpo de ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall y desarrollo un criterio de diseño de mezclas. El método original de Marshall, sólo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que contengan agregados con un tamaño

máximo de 25 mm (1") o menor. El método modificado se desarrolló para tamaños máximo arriba de 38 mm (1.5"). Está pensado para diseño en laboratorio y control de campo de mezclas asfálticas en caliente con graduación densa. Debido a que la prueba de estabilidad es de naturaleza empírica, la importancia de los resultados en términos de estimar el comportamiento en campo se pierde cuando se realizan modificaciones a los procedimientos estándar. El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de una altura de 64 mm (2 ½") y 102 mm (4") de diámetro. Se preparan mediante un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas de asfalto-agregado.

(ASTM D1559). Los dos aspectos principales del método de diseño son, la densidad-análisis de vacíos y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados.

Los dos elementos principales del método Marshall son un análisis de las relaciones entre densidad y volumen de huecos y un ensayo para la determinación de la estabilidad y fluencia de las probetas compactadas. La estabilidad del espécimen de prueba es la máxima resistencia en N (lb) que desarrolla cuando es ensayado a una temperatura de 60° C. El valor de flujo es el movimiento total o deformación, en unidades de 0.25 mm (1/100"), que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad.

El método Marshall solo establece requisitos para la granulometría y los parámetros volumétricos de la mezcla. Los requisitos de calidad del agregado y del asfalto los fijan las entidades encargadas del desarrollo de la infraestructura.

2.3.8. Método de Diseño Super Pave

Por los años de 1987, el Strategic Highway Research Program (SHRP), se estableció en el Congreso de los Estados Unidos, con un presupuesto adjudicado de 150 millones de dólares en programas de investigación, para encontrar las mejoras en el desempeño y la vida útil de las carreteras, en consecuencia, incrementando la seguridad para los vehículos y para los usuarios en general. Iniciando el desarrollo de un nuevo sistema para especificar materiales asfálticos, el resultado final del programa es un nuevo sistema llamado Superpave (Superior Performing Asphalt Pavement). Representa una tecnología de tal manera provista que pueda especificar cemento asfáltico y agregado mineral, desarrollar diseños de mezclas asfálticas; analizar y establecer predicciones del

desempeño del pavimento. Este método evalúa los componentes de la mezcla asfáltica en forma individual (agregado mineral y asfaltos) y su interacción cuando están mezclados.

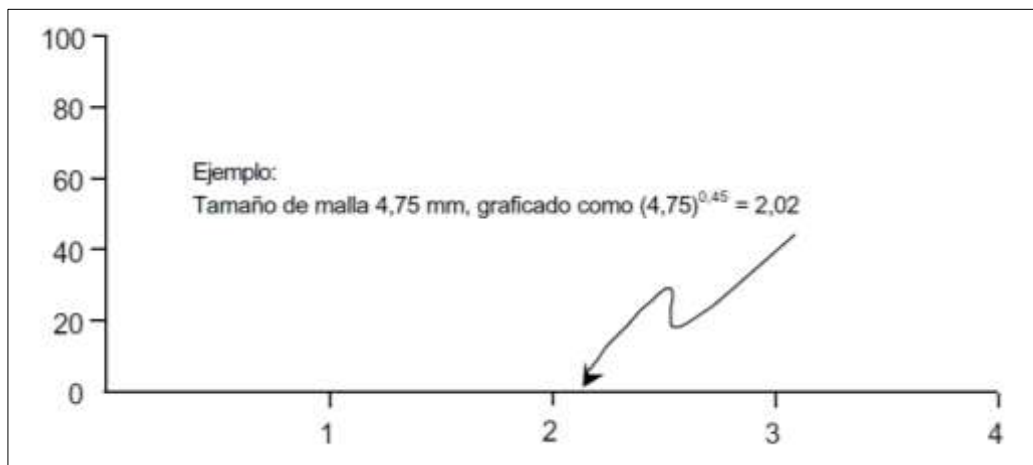
Materiales

a) Granulometría

Para especificar la granulometría, Superpave ha modificado el enfoque de la granulometría Marshall. Emplea el exponente 0.45 en la carta de granulometría para definir la permitida (gráfica de Fuller), mediante una técnica gráfica única para juzgar la distribución de tamaños acumulados de partículas de una mezcla de agregados. Las ordenadas de la carta son los porcentajes que pasan; las abscisas, en escala aritmética, representan las aberturas de los tamices en mm, elevadas a la potencia 0.45. La Figura 0.1 ilustra cómo se calcula el valor de la abscisa. En el ejemplo la malla de 4.75mm se grafica como 2.02. Normalmente este tipo de gráficas no muestran una escala aritmética común, en vez de ello, la escala está en función de tamaño de malla como se observa en la Figura 05.

Figura 05.

Gráfica de abscisas



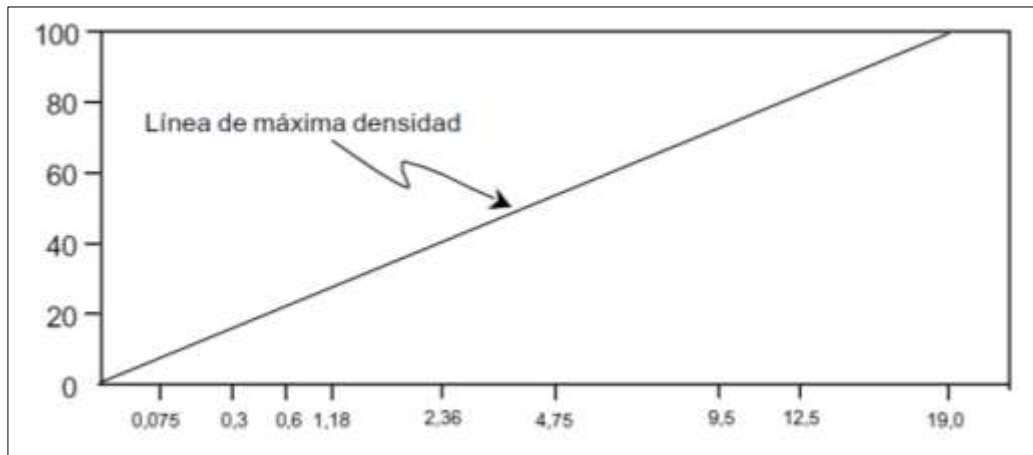
Fuente: Publicación Técnica No 246

La granulometría de máxima densidad representa la graduación para la cual las partículas de agregado se acomodan entre sí, conformando el arreglo volumétrico más compacto posible. Evidentemente, esta granulometría debe evitarse porque habría muy poco espacio entre los agregados como para permitir el desarrollo de una película de asfalto lo suficientemente gruesa, como para obtener una mezcla durable. Para especificar la granulometría del agregado, se

emplean dos conceptos adicionales: puntos de control y una zona restringida. Los puntos de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica y corresponden al tamaño máximo nominal, un tamaño intermedio (2.36 mm) y un tamaño de finos (0.075 mm).

Figura 06.

Graduación de Máxima Densidad para Tamaño Máximo 19mm

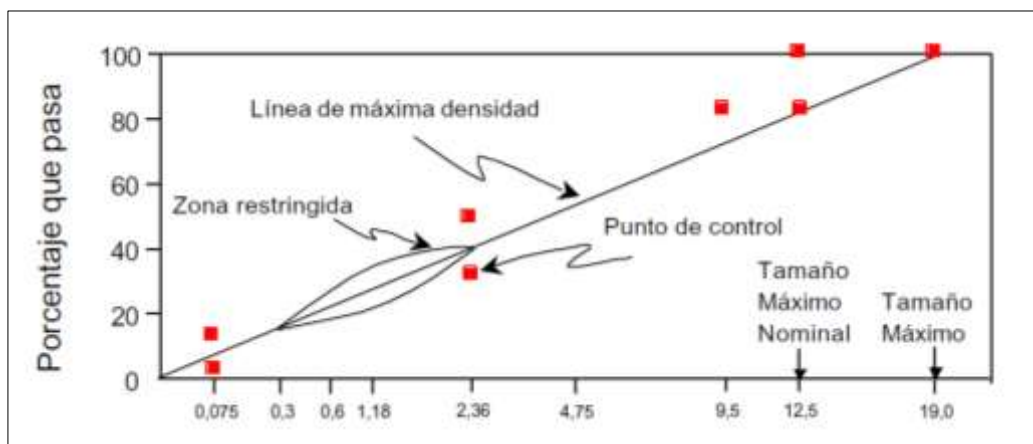


Fuente: Adaptado de Publicación Técnica N°271, Safandila, Qro, (2005).

Un diseño de la estructura del agregado que pase entre los puntos de control y evite la zona de restricción, satisface los requerimientos granulométricos de Superpave. Los valores de los parámetros: puntos de control y zona restringida, están referenciados a cinco designaciones que la metodología Superpave establece, en las cuales proponen los tamaños máximos nominales más utilizados y los criterios correspondientes a los parámetros mencionados.

Figura 07.

Límites para la Granulometría Superpave



Fuente: Adaptado de Publicación Técnica N°271, Safandila, Qro, (2005).

Asfalto

b) Pruebas en el cemento asfáltico

Las pruebas en el cemento asfáltico enfocan la medición de las propiedades físicas y reológicas que están directamente relacionadas con el desempeño en campo a través de las particularidades ingenieriles.

Las pruebas del asfalto bajo la Metodología Superpave, implica replicar en laboratorio lo que realmente va a suceder en campo, con las condiciones de carga y temperatura para las cuales soportara el pavimento.

Las especificaciones Superpave tienen por objetivo principal simular las condiciones del cemento asfáltico en tres etapas críticas durante la vida del asfalto.

La primera etapa: Transportación, almacenamiento y manejo.

La segunda etapa: Producción, mezcla y construcción, son simuladas mediante especificaciones de envejecimiento del asfalto en el Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO), la película delgada del asfalto se expone a calor y aire para simular el envejecimiento que sufre el asfalto durante su mezcla y construcción.

La tercera etapa: Cuando el Asfalto está envejecido, desde la colocación de la mezcla, hasta el fin de su vida útil. Esta etapa se simula en la vasija de envejecimiento a presión (PAV), sometiendo al asfalto a calor y presión.

Tabla 13.

Propósito de las pruebas de Asfalto Superpave.

Horno Rotatorio de película delgada (RTFO)	Simula las características del envejecimiento del asfalto
Vasija de envejecimiento a presión (PAV)	Mide las propiedades del asfalto a temperaturas altas e intermedias
Reómetro de corte dinámico (DSR)	Mide las propiedades del asfalto a altas temperaturas
Viscosímetro rotacional (RV)	Mide las propiedades del asfalto a bajas temperaturas
Reómetro de viga en flexión (BBR)	
Ensaye de tensión directa (DTT)	

Fuente: Adaptado de Publicación Técnica N°271, Safandila, Qro, (2005).

Figura 08.

Evolución de las etapas críticas de la vida del asfalto



Fuente: XIV ALACPA de Pavimentos Aeroportuarios, L.Araya. Et Al (2018)

2.3.9. Ensayo del efecto de la humedad a la Tensión Diametral

AASHTO T-283, Para la evaluación de la adherencia Árido ligante, se ha utilizado el test de LOTTMAN modificado. El método propone evaluar la resistencia de las mezclas asfálticas compactadas, al daño causado por la humedad, utilizando el método propuesto por la norma ASSHTO T 283: conocido como Test de Lottman modificado. Es un ensayo que se ajusta más a las condiciones de obra cuantificando la adhesividad. El mismo ha permitido determinar la resistencia a la tracción indirecta de las muestras, midiendo la pérdida de cohesión de una mezcla compactada como resultado de los efectos de la saturación acelerada en agua, permitiendo medir la resistencia de la mezcla en su conjunto. El procedimiento consta de los siguientes pasos: un grupo de probetas deben ser ensayadas a tracción indirecta luego de estar acondicionadas en un baño de agua a 25 °C durante 2 horas, denominado grupo en seco.

El segundo grupo, se acondicionará de la siguiente manera: primero se saturan las probetas colocadas en un recipiente con agua por medio de vacío, luego se colocan a -18 °C durante 16 horas, cumplido este paso se colocan las probetas en un baño de agua a 60 °C durante 24 horas, inmediatamente después se colocan en un baño de agua a 25 °C durante 2 horas, para luego ser ensayadas a tracción indirecta, siendo el 80 % el valor mínimo de exigencia de la relación de las tensiones de tracción indirecta, es común encontrar esta relación por las siglas en inglés de tensile strength ratio (TSR).

2.3.10. Vida a la Fatiga (BBF)

El fenómeno de fatiga es uno de los principales mecanismos de daño de mezclas asfálticas en servicio, ocurre cuando las capas ligadas al pavimento y, para el caso de estructuras flexibles, se presenta cuando se generan valores elevados de deformación a tracción en la zona inferior de la carpeta asfáltica producto de las cargas impuestas por el parque automotor (cargas repetidas). El paso continuo de vehículos hace que la capa asfáltica flexiones, generando esfuerzos de tensión en su extremo inferior. Esta repetición de carga hace que la mezcla asfáltica pierda rigidez y origina la aparición de deformaciones plásticas a tracción, que a su vez conducen a la formación de microfisuras. (Masad et al. 2008; Xiao et al. 2009; Nejad et al. 2010). AASHTO T-321, mediante la aplicación de cargas cíclicas el ensayo permite recrear los efectos producidos por el tránsito de los vehículos sobre el pavimento asfáltico. Las probetas son sometidas a deformaciones controladas de 250 us, 300 us, 400 us y 500 us mientras va perdiendo rigidez hasta llegar a un 50% de su rigidez inicial, considerando como el límite de fallo por fatiga. Así mismo establece estados que proporcionan cargas repetidas sinusoidales en un rango de frecuencia de 5 a 10 Hz obligando a la muestra a volver a su posición original (es decir, cero deflexiones) al final de cada pulso de carga.

2.3.11. Rueda de Hamburgo

El ensayo obedece a AASHTO T 324, procedimiento para determinar la susceptibilidad a la deformación permanente, el ahuellamiento es uno de los mayores daños que genera deterioros en el pavimento de capas asfálticas. El ahuellamiento puede ser definido como la deformación vertical permanente acumulable en el pavimento debido al exceso de paso repetitivo de los vehículos, lo que genera la aparición de depresiones longitudinales en la superficie del pavimento asfáltico en la misma trayectoria de las llantas. Asimismo, estas pueden generar fallas estructurales o funcionales en el pavimento. Sin embargo, investigadores como Sousa et al (1994) y Chen et al (2003) han reportado que la susceptibilidad a ahuellamiento es más frecuente en la capa asfáltica. Para hallar la condición del pavimento frente al deterioro del ahuellamiento se tiene diferentes ensayos de laboratorio, donde el más reconocido es el Wheel – Track de Hamburgo o la Rueda de Hamburgo T 324, la cual describe el procedimiento para evaluar la susceptibilidad a la deformación permanente y el daño por humedad de mezclas asfálticas en caliente usando especímenes sumergidos en un baño de agua a una temperatura controlada de 40°C a 50°C, bajo la acción de la carga de llanta en el equipo

Rueda de Hamburgo. Los procedimientos son para especímenes cilíndricas de aproximadamente 150 mm de diámetro y 62 mm de altura compactadas en mediante el compactador giratorio Superpave. El ensayo arroja como resultado la tasa de deformación medida en la profundidad de la huella de la Rueda de Hamburgo y la cantidad de pasadas a la cual la muestra falla, según las especificaciones T – 324 (12.5mm profundidad máximo de la huella a 20, 000 pasadas)

2.4. Definición de términos básicos

2.4.1. Daño Por Humedad en Pavimentos Asfálticos.

Memorias XVIII CILA ISBN 978-950-630-031-9, el daño prematuro de los pavimentos asfálticos se atribuye a la presencia de agua en la mezcla asfáltica. La manifestación más común del deterioro causado por la presencia del agua al interior de una mezcla en pavimentos flexibles es la pérdida del recubrimiento del asfalto de la superficie de los agregados. Además, se puede presentar el desprendimiento progresivo de los agregados de la superficie de la mezcla causado por el paso de las llantas de los vehículos sobre el material asfáltico. Estos dos tipos de manifestaciones de daño tienen en común la pérdida de las propiedades de adhesión en la interface agregado cemento asfáltico.

2.4.2. Flujo de la Mezcla Asfáltica

Bruce G. Marshall del Departamento de Caminos del Estado de Mississippi (EEUU), es la disminución del diámetro que experimenta la probeta entre el inicio de carga y el instante de rotura, expresada en mm con una aproximación de 0.1 mm.

2.4.3. Estabilidad de la Mezcla Asfáltica

Bruce G. Marshall del Departamento de Caminos del Estado de Mississippi (EEUU), es la carga máxima en N resistida por la probeta multiplicada por el factor de corrección correspondiente, función del volumen y del espesor de la probeta, expresada con una aproximación de 100 N, en consecuencia, mide la capacidad de resistir desplazamiento y deformación bajo la acción de cargas.

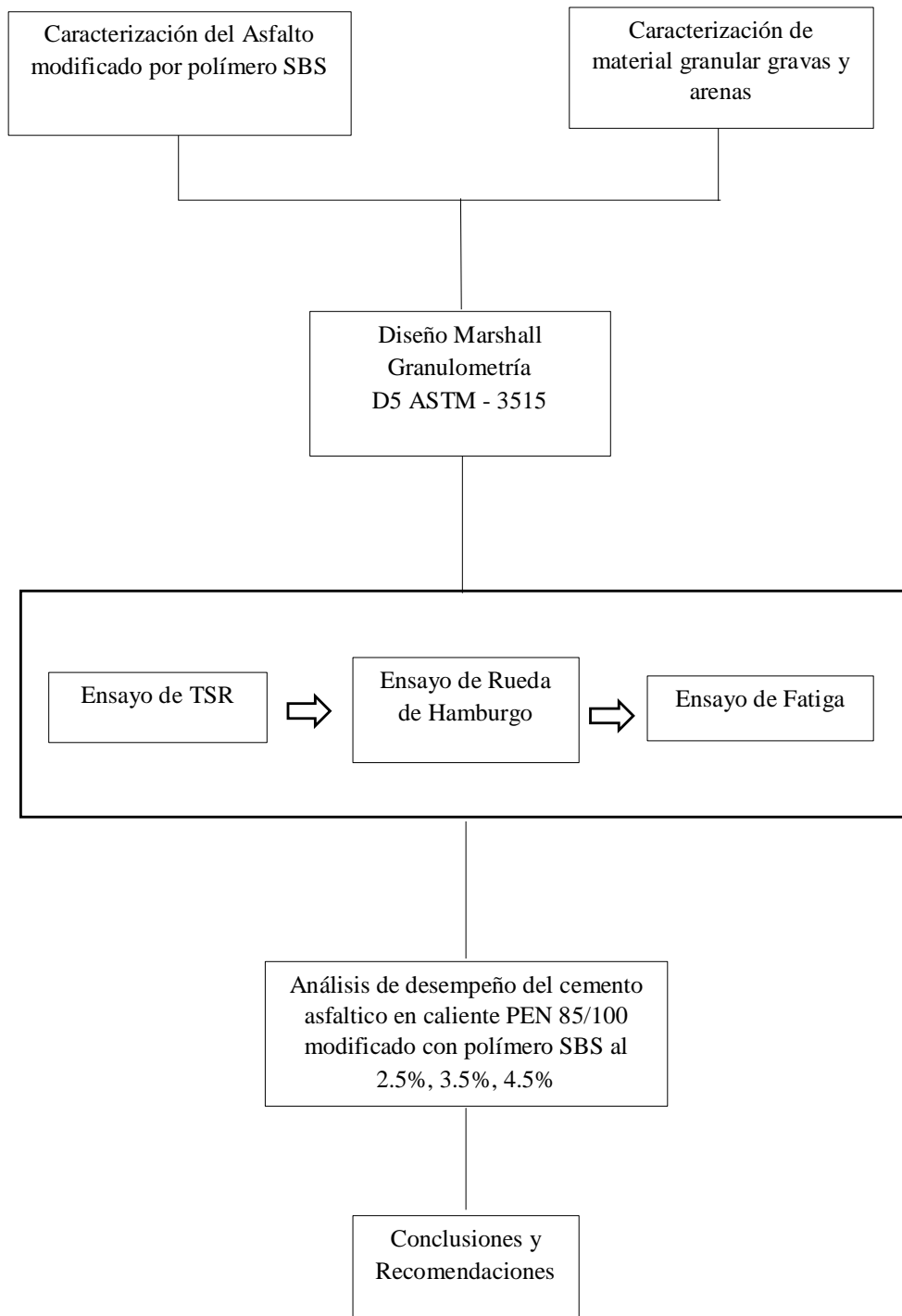
2.4.4. Asfalto Modificado

UDALAP (2011), los materiales asfálticos modificados son el producto de la dilución o incorporación en el asfalto, de un polímero o de hule molido de neumáticos, que son sustancias estables en el tiempo y a cambios de temperatura, que se le añaden al material asfáltico para modificar sus propiedades físicas y reológicas, y disminuir la susceptibilidad térmica, así como la oxidación.

2.5. Fundamentos teóricos que sustenta la hipótesis

Figura 09.

Fundamento teórico que sustenta la hipótesis



2.6. Hipótesis

2.6.1. Hipótesis general

La incorporación de polímero SBS incrementa el desempeño de una mezcla asfáltica en caliente, medidos a través de ensayos Superpave.

2.6.2. Hipótesis específicas

- a) La incorporación de polímero SBS incrementa la resistencia a fatiga de una mezcla asfáltica en caliente.
- b) La incorporación de polímero SBS incrementa la resistencia a ahuellamiento de una mezcla asfáltica en caliente.
- c) La incorporación de polímero SBS incrementa la resistencia al daño por humedad de una mezcla asfáltica en caliente.

2.7. Variables

2.7.1. Variable dependiente

Desempeño de la Mezcla Asfáltica, se realizarán los ensayos correspondientes a fin de determinar los parámetros de desempeño cuando se incorpore diferentes porcentajes de asfalto modificado con polímero SBS.

2.7.2. Variable independiente

Polímero SBS, se realizarán diferentes variaciones de porcentaje de asfalto modificado con polímero SBS, para satisfacer los ensayos de desempeño.

2.7.3. Variable interviniente

Mezcla asfáltica en caliente, se calculará el óptimo contenido de asfalto modificado con polímero con un tipo de gradación (D-5 ASTM 3515), y se variará de porcentaje para satisfacer los ensayos de desempeño.

2.8. Relación entre variables.

2.8.1. Operacionalización de variables.

Tabla 14.
Operacionalización de variables

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES	INSTRUMENTO	HERRAMIENTA
Desempeño de la Mezcla Asfáltica en Caliente (Variable Dependiente)	EL deterioro prematuro del pavimento se debe al comportamiento de los materiales que lo conforman, los diferentes tipos de clima y el número de repeticiones de cargas de tráfico, el diseño Marshall que caracteriza la resistencia de la mezcla asfáltica en caliente solo en parámetros volumétricos y de estabilidad - flujo, este método se debe corroborar a través de los ensayos por desempeño Superpave, que cumple que los requerimientos de un óptimo contenido de ligante asfáltico y satisfaga los parámetros de fatiga y ahuellamiento	Resistencia	Capacidad de resistir desplazamiento.	Ensayo Marshall	MTC E-504
			Capacidad de resistir a la deformación bajo la acción de cargas.		
		Durabilidad	Resistencia al daño causado por la humedad.	Ensayo TSR	AASHTO T-283 MTC E-522
			Elección adecuada del PEN. Adhesividad del agregado con el PEN		
		Gradación de materiales	Resistencia a la deformación permanente, bajo diferentes cargas, a diferentes temperaturas.	Ensayo Rueda de Hamburgo	AASHTO T-324
Trabajabilidad	Gradación del Tipo de MAC (D-5 ASTM 3515) Elección adecuada del PEN 85/100	Ensayo Viga de Fatiga	AASHTO T-321		
				Optima dosificación de asfalto modificada con polímero SBS, para satisfacer parámetros Marshall y desempeño de la mezcla medidos en parámetros de fatiga y ahuellamiento	
Polímero SBS (Variable Independiente)			Porcentaje de Asfalto Porcentaje de Polímero SBS		

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Método, tipo y diseño de investigación

3.1.1. Método de investigación.

Según Hernández, Fernández Baptista (2014), deductivo, porque a partir de la teoría existente, se va a analizar nuevos conocimientos para soluciones de problemas prácticos, contrastando hipótesis y correlación de las variables, en este caso el diseño óptimo de la mezcla asfáltica en caliente modificada con polímero SBS que verificara parámetros volumétricos y de desempeño en fatiga y ahuellamiento de una mezcla asfáltica en caliente a través de un contenido óptimo de asfalto inicial modificada con polímero SBS al 2.5%, 3.5% y 4.5% del ensayo Marshall. En la actualidad en los países a nivel mundial buscan alternativas de solución para los daños causados por la humedad, el ahuellamiento y fatiga que produce fisuras en la carpeta de rodadura. Asimismo, se comprobó que la modificación con polímero SBS genera una mejor performance en el desempeño de la mezcla asfáltica en caliente, toda vez que, se busca optimizar el porcentaje de asfalto modificado con polímero SBS que satisfaga parámetros de ahuellamiento y fatiga, encontrando un balance en el diseño por desempeño, repercutiendo en la vida útil del pavimento. La orientación es aplicada porque va a resolver problemas en base a la teoría. Se pretende incrementar la vida útil del pavimento y esto se consigue con un óptimo contenido de asfalto modificado con polímero SBS satisfaciendo parámetros volumétricos, ahuellamiento y fatiga, asimismo observando un buen comportamiento mecánico y dinámico, la teoría del diseño de mezclas asfálticas en caliente según Marshall solo incorpora en la medición de resistencia a parámetros volumétricos, de estabilidad - flujo, y con ello se encuentra un óptimo contenido de asfalto, sin embargo se pretende realizar ensayos de desempeño para medir fatiga y ahuellamiento y encontrar un óptimo contenido de asfalto modificado con polímero SBS que cumplan tanto parámetros Marshall como desempeño de la mezcla. Según el enfoque cuantitativa, porque al realizar el diseño balanceado de una mezcla asfáltica en caliente se va a medir el desempeño mecánico con los valores Marshall: Estabilidad (>831 kg), Flujo (8-14), Resistencia al daño por humedad (80% min.), Resistencia a la deformación Permanente (<12.5mm) y Resistencia a la fatiga (50% máx.). La Fuente de recolección de datos Retrolectiva, se basa en instrumentos ya existentes como son los formatos del Ministerio de

Trasportes y Comunicaciones, la Guía AASHTO y SUPER PAVE. La recolección de datos como son: cemento asfáltico modificado con polímero SBS, material grueso, material fino, filler estarán en concordancia y con la exigencia mínima de parámetros de los distintos manuales del MTC y diseño SUPERPAVE.

3.1.2. Tipo de investigación

Según Hernández, Fernández Baptista (2014), Descriptiva, correlacional y explicativa, dado que se realizará, la descripción de las características y el desempeño mecánico inicial de una mezcla asfáltica en caliente convencional encontrado el óptimo contenido de asfalto modificado con polímero SBS mediante el ensayo Marshall, para luego correlacionar con 3 puntos de contenido de asfalto para los ensayo de desempeño a fatiga y ahuellamiento, explicar la variación de óptimo contenido de asfalto modificado con polímero SBS encontrando un solo parámetro, que cumpla volumetría, estabilidad – flujo y desempeño de la mezcla asfáltica en caliente.

3.1.3. Nivel de la investigación

Según Hernández, Fernández Baptista (2014), descriptiva, porque se calculará el porcentaje de asfalto modificado con polímero SBS que satisfaga parámetros volumétricos, estabilidad – flujo, fatiga y ahuellamiento y a la vez mejore el desempeño mecánico de la mezcla asfáltica en caliente.

3.1.4. Diseño de investigación

Según Hernández, Fernández Baptista (2014), experimental, porque se manipulará la variable independiente como es polímero SBS en distintos porcentajes 2.5%, 3.5% y 4.5% encontrando un balance que está ligado al porcentaje de asfalto y se obtendrá un solo porcentaje que determine el desempeño mecánico de la mezcla asfáltica en caliente en parámetros volumétricos, estabilidad – flujo, fatiga y ahuellamiento. Longitudinal ya que realizarán varias briquetas de una mezcla asfáltica en caliente con porcentajes diferentes de asfalto modificado con polímero SBS que cumpla el requerimiento Marshall, las cuales se ensayarán y se obtendrán diferentes resultados, y a partir de ese óptimo se preparan especímenes para verificación de fatiga y ahuellamiento por cada porcentaje modificado las

cuales deberán estar en relación al desempeño mecánico con un mismo contenido de asfalto modificado con polímero SBS. Prospectivo debido a que todos los resultados se obtendrán en laboratorio a partir de la elaboración de briquetas de mezclas asfálticas, y especímenes, las cuales se ensayarán mediante el ensayo Marshall, Resistencia al daño por humedad (test de lottman), Viga por Fatiga y Resistencia al Ahuellamiento.

3.2. Población y Muestras

La población del presente estudio de esta investigación son las briquetas y los especímenes de mezcla asfáltica en caliente con adición de distintos porcentajes de asfaltos modificado con polímero SBS, provenientes de la empresa CASA ASFALTOS.

Ensayo Marshall se realizarán briquetas de mezcla asfáltica en caliente modificada con polímero, luego una vez obtenido el óptimo contenido de asfalto modificado con polímero SBS, procederá a fabricar especímenes para los ensayos de viga a fatiga y ahuellamiento, se tomaran proporciones en adición de polímero SBS de 2.5%, 3.5% y 4.5% para encontrar con el porcentaje de asfalto que mejora en conjunto las propiedades de la mezcla medidos en parámetros de Resistencia al daño por humedad (test de Lottman), Viga por Fatiga y Resistencia al Ahuellamiento. Se procederá con el porcentaje resultado del ensayo Marshall.

Tabla 15.

Cantidad de muestras para determinar el óptimo de asfalto.

POLIMERO SBS	Porcentaje de Asfalto (%)				Número de muestras
	5	5.5	6	6.5	
	Resistencia de mezclas bituminosas empleando Aparato Marshall - MTC E 504				
2.50%	3	3	3	3	12
3.50%	3	3	3	3	12
4.50%	3	3	3	3	12
	Total				36

Fuente: EG-2013-optimo contenido de asfalto.

Tabla 16.*Cantidad de muestras para medir el desempeño de la mezcla AASHTO T283.*

POLIMERO SBS	Porcentaje de Asfalto (%)				Numero de muestras
	5	5.5	6	6.5	
	Resistencia a la compresión diametral de mezclas bituminosas AASHTO T283				
2.50%	6	6	6	6	24
3.50%	6	6	6	6	24
4.50%	6	6	6	6	24
	Total				72

Fuente: EG-2013

Tabla 17.*Cantidad de muestras para medir el desempeño de la mezcla AASHTO T321.*

POLIMERO SBS	Porcentaje de Asfalto (%)			Numero de muestras
	5.5	5.6	5.7	
	Resistencia a la fatiga de mezclas bituminosas – AASHTO T321			
2.50%		1		1
3.50%				1
4.50%			1	1
	Total			3

Fuente: AASHTO 2010

Tabla 18.*Cantidad de muestras para medir el desempeño de la mezcla AASHTO T324.*

POLIMERO SBS	Porcentaje de Asfalto (%)			Numero de muestras
	5.5	5.6	5.7	
	Resistencia a la deformación permanente de mezclas bituminosas AASHTO T324			
2.50%		1		1
3.50%	1			1
4.50%			1	1
	Total			3

Fuente: AASHTO 2010

3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Técnicas.

En la presente investigación se empleó la técnica de la observación, previa ejecución de ensayos de caracterización de los agregados y cemento asfáltico de acuerdo al Manual de Carreteras – Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG-2013 (MTC, 2013), se realizó el procedimiento descrito por la Metodología Marshall con el cual se realizó el diseño de mezcla convencional con la finalidad de encontrar el óptimo contenido de asfalto modificado con polímero SBS a porcentajes de 2.5%, 3.5% y 4.5% y en virtud de ello realizar el desempeño mecánico de esta mezcla con diferentes porcentajes de asfalto. Para ello se realizó el ensayo Marshall para la determinación de los parámetros de comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica (estabilidad, fluidez, densidad, vacíos de la mezcla, y vacíos del agregado mineral), con el cual se determina el porcentaje óptimo de asfalto del asfalto modificado con polímero SBS en sus distintas dosificaciones. Con los óptimos contenidos de asfalto de mezclas por cada porcentaje modificado con polímero SBS, se procedió a evaluar su comportamiento mediante los ensayos de caracterización y desempeño: Resistencia por humedad inducida en Mezclas Asfálticas (Tracción Indirecta), Desempeño a Fatiga y Resistencia a la deformación permanente, donde se observará los diferentes parámetros y del mismo modo se registrará los resultados para compararlos y mencionar conclusiones significativas.

Instrumentos

El instrumento de recolección de datos fue las fichas donde se registró todos los datos concernientes a caracterización de materiales (agregado grueso, agregado fino), caracterización del PEN 85/100. Asimismo, en cuanto a la elaboración de la mezcla asfáltica en caliente modificada con polímero SBS se registró los resultados de los ensayos que ya están establecidos en la normativa peruana e internacional para verificar el desempeño mecánico de la mezcla asfáltica en caliente en parámetros de estabilidad y flujo, posterior a ellos una vez obtenido los contenidos de asfaltos se procedió a verificar mediante ensayos Superpave el comportamiento de la mezcla asfáltica en caliente, bajo los ensayos de fatiga y ahuellamiento.

3.4. Descripción del procedimiento de análisis

Se tomó como base los antecedentes internacionales y nacionales mencionados en la presente investigación para formular los procedimientos de encontrar el óptimo contenido de asfalto modificado con polímero SBS, que satisfaga parámetros mecánicos (Estabilidad – Flujo) y parámetros dinámicos (Fatiga y Ahuellamiento), “El asfalto solo no puede hacer frente al aumento de los volúmenes de tráfico/carga en carreteras donde las cargas de tráfico se duplican enormemente, a altas temperaturas y velocidades más lentas” (Shafii et al 2011). “Se han probado diferentes tipos de aditivos para modificar el asfalto base con la finalidad de aumentar la resistencia al desgaste del pavimento. En general, las fibras y los polímeros son dos de los principales materiales más utilizados en la modificación del asfalto” (Lie y Wu 2011). Para el ensayo Marshall se realizarán briquetas de mezcla asfáltica en caliente con la incorporación de polímero SBS (2.5%, 3.5% y 4.5%), el óptimo contenido de asfalto modificado con polímero SBS se encontrará a partir del incremento de las propiedades mecánicas medidos en parámetros Marshall (estabilidad, fluidez, densidad, vacíos de la mezcla, y vacíos del agregado mineral). Asimismo, para el ensayo de resistencia a la tracción indirecta (daño por humedad - TSR) se procederá con los mismos porcentajes a realizar; briquetas grupo seco y otros vía humedad por cada porcentaje de polímero SBS, cuya relación es la resistencia a la tracción indirecta (TSR-80% min.), asimismo, para el ensayo de fatiga, se verificara de acuerdo al óptimo contenido de asfalto modificado con polímero SBS en los porcentajes indicados y los resultados estarán en función de, rigidez inicial calculada en el ciclo número 50, con una tensión aplicada de 500 microstrain, la condición de parada fue: la rigidez final o terminación la cual da el 50% de la rigidez inicial, no obstante, verifica para esa condición el número de ciclos alcanzados, finalmente para el ensayo de la Rueda de Hamburgo se verificará en función de los porcentajes de polímero SBS respectivamente y se verificara los resultados en función de la máxima profundidad de la huella que es 12,00 mm.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Resultados

Los resultados para los 03 ensayos característicos de mezclas asfálticas son los siguientes:

Para el ensayo Marshall, se midió valores de estabilidad y flujo se puede evidenciar de acuerdo a la tabla 26, el óptimo contenido de asfalto es de 5.5% con un 3.5% de polímero, respecto a los otros dos valores, para tasas de 2.5% y 4.5% que presentan valores de 1066 kg y 1032 kg respectivamente, asimismo, los parámetros de flujo en los tres casos están dentro de las especificaciones, pero resalta la tasa de 3.5% de polímero SBS con un valor menor de 12.5 (0.01”).

Para el ensayo de TSR, con una tasa de asfalto de 5.5% y 3.5% de polímero SBS, alcanzan valores de 87.8% por encima de las tasas de 2.5% y 4.5% que también están dentro del rango, existe decadencia de la resistencia al daño por humedad con 4.5% ya que arroja resultado de 83.6% que empiezan a alcanzar el valor mínimo del ensayo que es de 80%.

Para el ensayo de rueda de Hamburgo de acuerdo a la tabla 28 muestra que, con 2.5% de polímero SBS, 5.6% de asfalto presenta una deformación de 8.07 mm, para 3.5% de polímero SBS, 5.5% de asfalto presenta una deformación de 6.16 mm., y para 4.5% de polímero SBS, 5.7% de asfalto presenta una deformación de 3.65mm, todos estos valores medidos y están dentro de la especificación que es de 12 mm como máximo.

Para el ensayo de Vida de Fatiga presentan valores que se muestran en la tabla 29, para una rigidez inicial calculada al número de ciclo 50, los porcentajes de polímero 2.5%, 3.5% y 4.5%, alcanzan valores de 695010, 1061040 y 1417090 respectivamente.

Descripción de los procedimientos de para alcanzar los resultados llevados a cabo en el laboratorio, resumen de todos los ensayos de caracterización de materiales, elección del tipo de asfalto, elección del tipo de granulometría a utilizar (MAC o ASTM D 3515), elección del tipo de polímero a utilizar, todo ello para materializar los resultados, en concordancia con los manuales y normativas vigentes del Ministerio de Transportes y Comunicaciones; Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción EG-2013, Manual de Suelos y Pavimentos, Manual de Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente MS-22 (Instituto de Asfalto, 1982), Manual de Ensayo de Materiales (MTC-2016), Normativa American Society for Testing and Materials (ASTM) y Manuales ASSHTO.

Con respecto al material granular se utilizó por donación de la Empresa Vargas Laurente S.A.C muestras extraídas de cantera de Rio Mantaro – Concepción, de uso granulométrico D-5 correspondiente a la ASTM D 3515, las dosificaciones que se utilizó fueron las siguientes gravas trituradas $\frac{3}{4}'' - \frac{3}{8}'' - 40\%$, arena triturada – 20%, arena natural 40%. Se utilizó un asfalto de PEN 85/100 modificado con polímero SBS en proporciones 2.5%, 3.5% y 4.5% de la Empresa CASA ASFALTOS, a partir de ello se encontró el óptimo contenido de asfalto para cada proporción indicada de polímero. Finalmente, con los óptimos contenidos de asfalto modificado con polímero se procedió al análisis de los parámetros Marshall (Estabilidad – Flujo), Rueda de Hamburgo y Fatiga.

4.1.1. Materiales utilizados

Cemento asfáltico

De acuerdo a las especificaciones técnicas generales para la construcción EG-2013, el cemento asfáltico a emplear en mezclas asfálticas en caliente serán clasificados por viscosidad absoluta y por penetración, el tipo de cemento asfáltico estará en función de las características climáticas de la zona del proyecto, tal como lo indica la tabla 415. EG-2013. En la presente investigación se propuso el ámbito de aplicación sobre los 3000 msnm, con materiales de agregados propios de la ciudad de Huancayo – Concepción, la selección del tipo de cemento asfáltico fue en función de la tabla N°20, temperatura media anual entre 15°C a -5°C, donde especifica la utilización de asfalto de grado de penetración PEN 85/100.

Tabla 19.*Cemento asfáltico clasificado por penetración.*

Tipo		Grado de Penetración		
Grado	Ensayo	PEN		Resultado
		85-100		
		min.	máx.	
Pruebas sobre el Material Bituminoso				
Penetración a 25°C, 100g, 5s, 0.1mm	MTC E 304	85	100	
Punto de inflamación, c°	MTC E 312	232		
Ductilidad, 25°C, 5cm/min, cm	MTC E 306	100		
Solubilidad en Tricloro-etileno, %	MTC E 302	99,0		
Índice de Penetración (Susceptibilidad Térmica)	MTC E 304	-1	+1	
Ensayo de la Mancha (Olienses)				
Solvente Nafta - Estándar			Negativo	
Solvente Nafta - Xileno, % Xileno	AASHTO M20		Negativo	
Solvente Heptano - Xileno, % Xileno			Negativo	
Pruebas sobre la Película Delgada a 163°C, 3.2mm, 5h				
Pérdida de masa, %	ASTM D 1754		1	
Penetración retenida después del ensayo de película fina, %	MTC E 304	47+		
Ductilidad del residuo a 25°C, 5cm/min, cm	MTC E 306	75		

Fuente: Adaptado de las especificaciones técnicas generales MTC (2013).

Agregados pétreos

De acuerdo a las especificaciones técnicas generales para la construcción EG-2013, los agregados pétreos a utilizar deben tener buena adhesividad (asfalto-agregado) para contrarrestar los efectos del agua y del tránsito. Sólo se admitirá el empleo de agregados con características hidrófilas, si se añade algún aditivo de comprobada eficacia para proporcionar una adecuada adherencia. Para efecto de las presentes especificaciones, se denominará agregado grueso a la porción de agregado retenido en el tamiz de 4,75 mm (N.º 4); agregado

fino a la porción comprendida entre los tamices de 4,75 mm y 75 µm (N.º 4 y N.º 200) y polvo mineral o llenante la que pase el tamiz de 75 µm (N.º 200).

La tabla 20 y 21 muestran los resultados del análisis granulométrico de los agregados que se encuentran separados por fracciones debidamente chancados - triturados, agregados grueso de TM ¾”y TM ½” y los agregados finos (arena natural y arena chancada).

Tabla 20.

Análisis granulométrico por tamizado (% que pasa el tamiz)

TAMIZ	ABER.	Material N.º01	Material N.º02	Material N.º03	Material N.º04
ASTM	mm	Grava 3/8	Arena natural	Grava 3/4	Arena chancada
3/4"	19.000	100.0	100.0	100.0	100.0
1/2"	12.500	58.1	100.0	100.0	100.0
3/8"	9.500	82.0	96.6	86.2	100.0
# 4	4.750	98.7	78.3	7.1	71.0
# 8	2.360	99.3	74.3	0.9	44.0
# 50	0.420	0.0	38.9	0.6	19.5
# 80	0.180	0.0	14.5	0.5	11.9
# 200	0.075	0.0	6.2	0.3	7.6
>200					

Fuente: Ensayos realizado por la empresa Ingeocontrol

Los agregados a utilizar en la presente investigación son de cantera del río Mantaro, ciudad de Huancayo – Concepción, donados por la empresa Constructora Vargas Laurente S.A.C, asimismo, los agregados fueron combinados, toda vez que, la estructura granular sea la más adecuada cumpla un huso granulométricos y actúe de manera adecuada frente a las acciones del tránsito pesado, es por ello que el huso granulométrico que se adecua es el tipo MAC D-5 ASTMD 3515, se eligió esta disposición de gradación debido a la disponibilidad del material de la zona.

Tabla 21.*Husos granulométricos ASTM D-5 3515*

Abertura de malla	Mezcla cerrada					
	Tamaño máximo nominal del agregado					
	1 in (25,0 mm)	3/4 in (19,0 mm)	1/2 in (12,5 mm)	3/8 in (9,5 mm)	N° 4 (4,75 mm)	N° 16 (1,18 mm)
2 1/2"(63mm)						
2"(50mm)						
1 1/2"(37,5mm)	100					
1"(25,0mm)	90 - 100	100				
3/4"(19.0mm)	100	90 - 100	100			
1/2"(12.5mm)	56 - 80		90 - 100	100		
3/8"(9.5mm)	29 - 59	56 - 80	...	90 - 100	100	
N°4(4,75mm)	19 - 59	35 - 65	44 - 74	55 - 85	80 - 100	100
N°8(2.36mm)	45	23 - 49	28 - 58	32 - 67	65 - 100	95 - 100
N°16(1.18mm)					40 - 80	85 - 100
N°30(600µm)					35 - 65	70 - 95
N°50(300µm)	5. - 17	5. - 19	5. - 21	7. - 23	7. - 40	45 - 75
N°100(150µm)					3. - 20	20 - 40
N°200 (75µm)	1. - 7	2. - 8	2. - 10	2. - 10	2. - 10	9. - 20

Fuente: Adaptado de la ASTM D3515

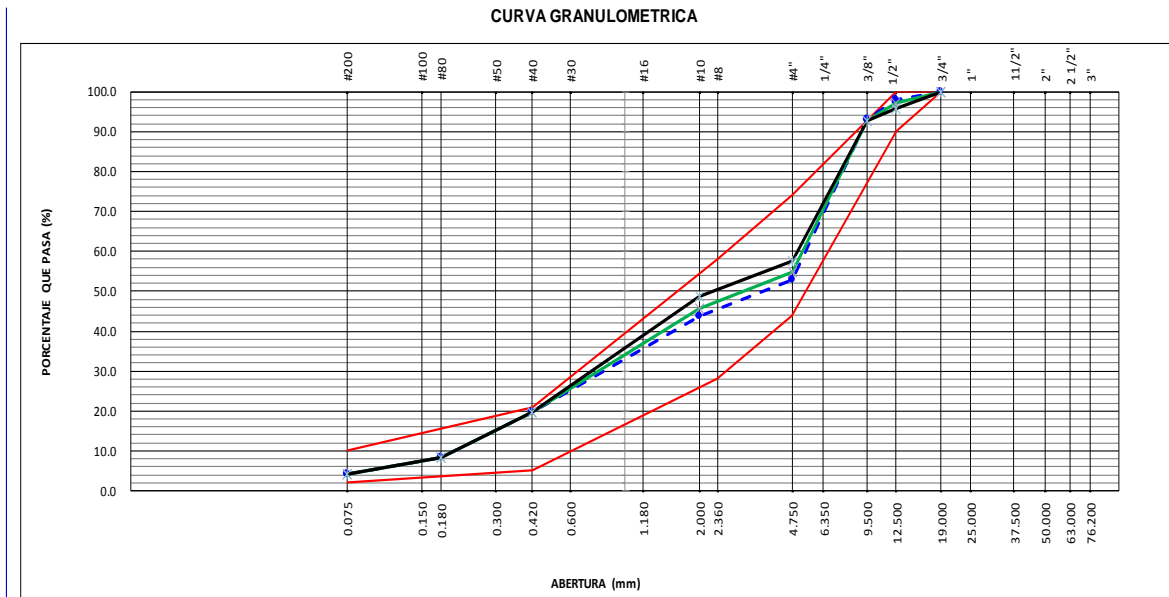
Tabla 22.*Combinación de agregado ASTM D-5 3515*

Agregado	Porcentaje
Grava triturada 3/4"	40%
Arena Natural	40%
Arena Chancada	20%

Fuente: Ensayos realizado por la empresa Ingeocontrol

Figura 10.

Gradación de agregados.



Fuente: Ensayos realizado por la empresa Ingeocontrol

4.1.2. Diseño de la mezcla asfáltica en caliente

Ensayo Marshall

El ensayo Marshall se realizó de acuerdo a la metodología que corresponde a la sección MTC E504 - Resistencia de Mezcla Bituminosas Empleando el Aparato Marshall indicada en el Manual de Ensayo de Materiales (2016), el objetivo es encontrar el óptimo contenido de asfalto en función de los parámetros Marshall.

Para determinar el óptimo contenido de asfalto modificado con polímero SBS al 2.5%, 3.5% y 4.5%, se fabricaron briquetas por cada dosificación de polímero SBS, en rangos de valores de tasas de asfalto 5%, 5.5%, 6%, 6.5%. Todas las briquetas fueron compactadas a 75 golpes por cara, simulando un tráfico pesado, asimismo, el procedimiento de ensayo es del tipo estático producto de la utilización del martillo Marshall.

Para la determinación de los parámetros Marshall, se procedió primero con un baño maría a 60 °C a las briquetas compactadas, luego seguido de ello, las probetas se adecuan en la mordaza del Marshall y se realiza la rotura de probetas encontrando los parámetros del máximo de estabilidad y flujo.

Figura 11.

Briquetas compactadas – martillo Marshall



Fuente: Ensayos realizado por la empresa Ingeocontrol.

Figura 12.

Briquetas compactadas en baño maría a 60C°



Fuente: Ensayos realizado por la empresa Ingeocontrol.

Figura 13.

Ensayo de rotura de probetas - Marshall



Fuente: Ensayos realizado por la empresa Ingeocontrol.

Se realizó el ensayo Marshall y se obtuvieron diferentes parámetros por cada porcentaje de polímero SBS, 2.5%, 3.5% y 4.5%, los que se detallan en la tabla 23.

Tabla 23.

Resultado de diseño Marshall modificado con polímero SBS 2.5%

Diseño Marshall	T. de mezcla (157.8-165.4 C°)	T. de compactación (147-154.6 C°)	Resultados de ensayos			
Parámetro de diseño	Unidad		2.5			
Polimero SBS 2.5%	%					
C.A.	%		5	5.5	6	6.5
Peso unitario	kg/cm ³		2.30	2.32	2.35	2.38
Vacíos	%		9	8	6	4
Vacíos agregado mineral	%		5.2	4.4	3.3	2.6
Vacíos llenos de asfalto	%		16.2	15.8	15.3	14.7
Flujo	0.01"		68.1	72.5	78.1	82.3
Estabilidad	kg		12.7	13.3	13.7	15.3
			1116	1084	983	812

Fuente: Ensayos realizado por la empresa Ingeocontrol

Tabla 24.

Resultado de diseño Marshall modificado con polímero SBS 3.5%

Diseño Marshall	T. de mezcla (157.8-165.4 C°)	T. de compactación (147-154.6 C°)	Resultados de ensayos			
Parámetro de diseño	Unidad		3.5			
Polimero SBS 3.5%	%					
C.A.	%		5	5.5	6	6.5
Peso unitario	kg/cm ³		2.315	2.332	2.36	2.394
Vacíos	%		4.4	3.6	2.5	0.9
Vacíos agregado mineral	%		15.9	15.7	15.1	14.4
Vacíos llenos de asfalto	%		72.1	77.3	83.7	93.6
Flujo	0.01"		12	12.8	13.3	15.3
Estabilidad	kg		1141	1059	1017	812

Fuente: Ensayos realizado por la empresa Ingeocontrol

Tabla 25.*Resultado de diseño Marshall modificado con polímero SBS 4.5%*

Diseño Marshall	T. de mezcla (157.8-165.4 C°)	T. de compactación (147-154.6 C°)	Resultados de ensayos			
Parámetro de diseño	Unidad					
Polimero SBS 4.5%	%		4.5			
C.A.	%		5	5.5	6	6.5
Peso unitario	kg/cm3		2.344	2.363	2.379	2.411
Vacíos	%		5.1	4.2	3.4	2
Vacíos agregado mineral	%		14.9	14.6	14.5	13.8
Vacíos llenos de asfalto	%		65.9	71.4	76.4	85.2
Flujo	0.01"		12.6	12.5	13.3	14.5
Estabilidad	kg		1076	1024	1017	851

Fuente: Ensayos realizado por la empresa Ingeocontrol

Incorporación de polímero SBS en asfalto PEN 85/100 para el diseño de mezcla asfáltica en caliente.

Ensayo Marshall, De acuerdo a lo descrito en la sección de análisis, se tomó como punto de partida los antecedentes para el planteamiento del procedimiento a realizar para la incorporación del polímero SBS al asfalto, debido a que mejora las propiedades reológicas del material en distintas proporciones de incorporación, en la presente investigación se incorporó porcentajes en peso de 2.5%, 3.5% y 4.5%. “El asfalto solo no puede hacer frente al aumento de los volúmenes de tráfico/carga en carreteras donde las cargas de tráfico se duplican enormemente, a altas temperaturas y velocidades más lentas” (Shafii et al 2011). “Se han probado diferentes tipos de aditivos para modificar el asfalto base con la finalidad de aumentar la resistencia al desgaste del pavimento. En general, las fibras y los polímeros son dos de los principales materiales más utilizados en la modificación del asfalto” (Lie y Wu 2011). De acuerdo a los antecedentes mencionados, el asfalto modificado con polímero SBS mejora las propiedades reológicas de la mezcla asfáltica en caliente, pero cuál es el porcentaje óptimo que mejora dichas propiedades encontrando una mezcla balanceada entre los ensayos de MARSHALL, TSR, Rueda de Hamburgo y Fatiga.

En la tabla 26 muestra los resultados encontrados para los óptimos contenidos de asfalto por cada porcentaje de polímero SBS ensayo Marshall para un huso granulométrico D-5 ASTD D3515, PEN 85/100 modificado con Polímero SBS, con ello se encontró los óptimos para cada porcentaje de asfalto modificado con polímero SBS; para 2.5 % (1066 estabilidad – 13.3 flujo), 3.5% (1089 estabilidad – 12.5 flujo), 4.5% (1032 estabilidad – 12.8 flujo). Como se describe la tabla 26.

Tabla 26.

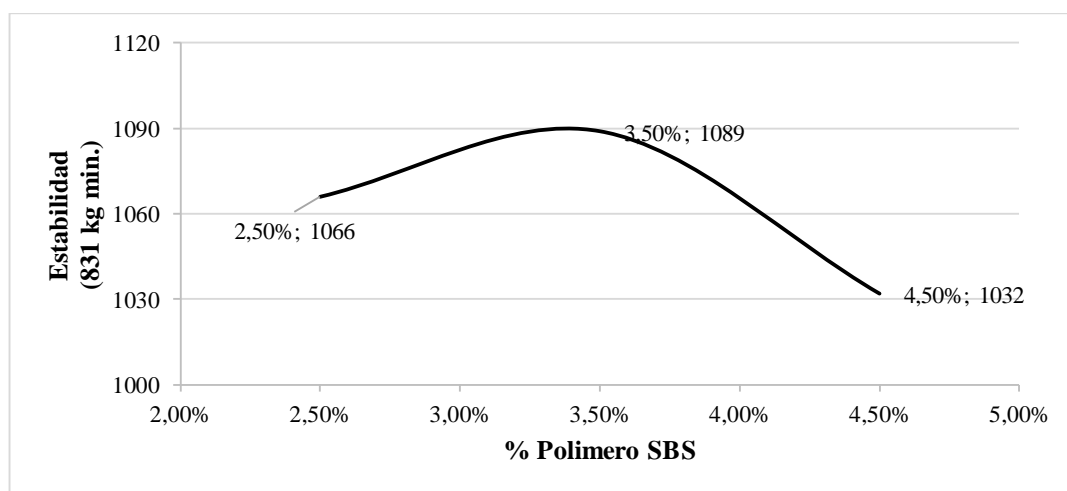
Óptimo de asfalto de diseño Marshall modificado con polímero SBS

Diseño Marshall	T. de mezcla (157.8-165.4 C°)	T. de compactación (147-154.6 C°)	Resultados de ensayos		
Parámetro de diseño	Unidad		2.5	3.5	4.5
Polimero SBS	%				
C.A.	%		5.6	5.5	5.7
Peso unitario	kg/cm ³		2.334	2.333	2.368
Vacíos	%		4.1	3.6	4
Vacíos agregado mineral	%		15.7	15.7	14.6
Vacíos llenos de asfalto	%		73.6	78	74
Flujo	0.01"		13.3	12.5	12.8
Estabilidad	kg		1066	1089	1032

Fuente: Ensayos realizado por la empresa Ingeocontrol.

Figura 14.

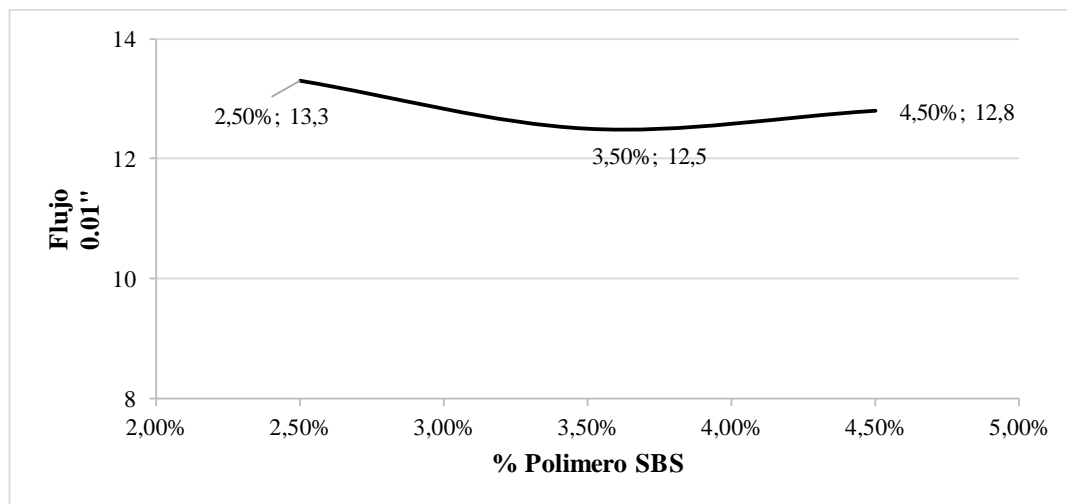
Estabilidad vs % de asfalto modificado con polímero



Fuente: Ensayos realizado por la empresa Ingeocontrol.

Figura 15.

Flujo vs % de asfalto modificado con polímero



Fuente: Ensayos realizado por la empresa Ingeocontrol.

Los valores encontrados para los parámetros de estabilidad y flujo muestran una tendencia de mejor comportamiento para adición de polímero SBS al 3.5%, (1089 kg) en cuanto al flujo para valores de 2.5% de incorporación de polímero se observa un incremento de valores llegando al límite que es de 14 (0.01’’), si bien es cierto que está dentro de los parámetros establecidos, con lo cual cumpliría los estándares de calidad de la mezcla.

Ensayo TSR, ensayo normado por AASHTO T-283, evalúa la adherencia del árido y ligante mediante el test LOTTMAN modificado. El método verifica la resistencia de mezclas asfálticas compactadas al daño causado por humedad, mediante la resistencia a la tracción indirecta. El procedimiento se realizará por cada porcentaje de asfalto modificado con polímero SBS 2.5%, 3.5% y 4.5%, primero un grupo de probetas se ensayan a tracción indirecta luego de estar acondicionadas en un baño de agua a 25°C durante 2 horas (grupo seco), segundo grupo, se saturan las probetas colocadas en un recipiente con agua por medio de vacío, luego se colocan a -18 °C durante 16 horas, cumplido este paso se colocan las probetas en un baño de agua a 60 °C durante 24 horas, inmediatamente después se colocan en un baño de agua a 25 °C durante 2 horas, para luego ser ensayadas a tracción indirecta, siendo el 80 % el valor mínimo de exigencia de la relación de las tensiones de tracción indirecta. Los valores encontrados por cada porcentaje de asfalto modificado con polímero se detallan en la tabla 27.

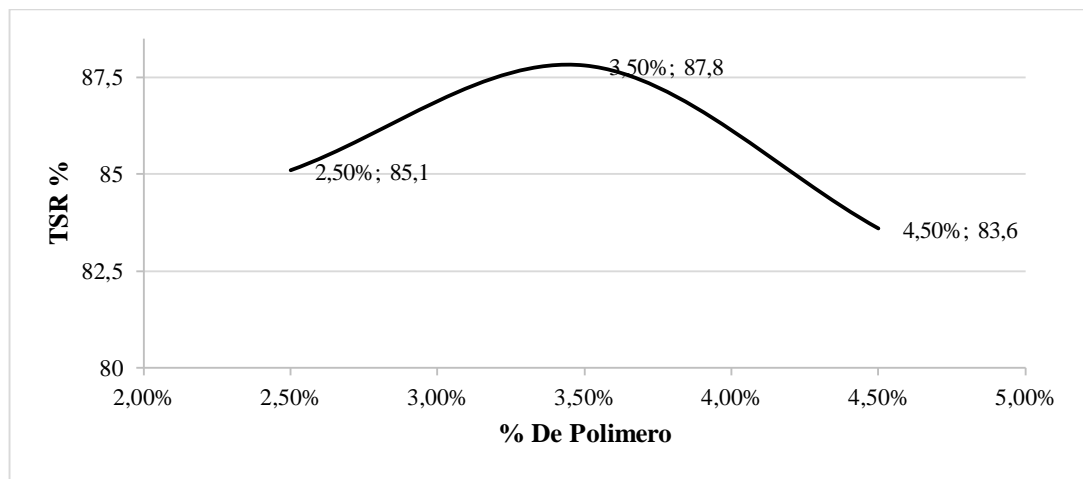
Tabla 27.

Resultados de TSR asfalto modificado con polímero SBS

Parámetros	Unidad	Esp.	% de incorporación de polímero SBS		
			2.50%	3.50%	4.50%
			5.6% OCA	5.5% OCA	5.7% OCA
TSR	%	Min. 80	85.1	87.8	83.6

Figura 16.

TSR vs % de asfalto modificado con polímero



Fuente: Ensayos realizado por la empresa Ingeocontrol.

De acuerdo a los resultados obtenidos tal como se muestran en tabla 27 y la figura 16, la relación de resistencia de muestras por vía seca y muestras por vía húmeda (TSR), pasa el valor mínimo de 80% establecido en las EG-2013, asimismo, existe una tendencia que decreciente para incorporación de polímero SBS al 4.5%, encontrando el valor más alto para la incorporación de 3.5% de polímero SBS.

Ensayo Rueda de Hamburgo, ensayo normado por AASHTO T 324, procedimiento por el cual se determina la susceptibilidad a la deformación permanente, el ensayo se realizó en las instalaciones de Empresa CASA ASFALTO, para ello se fabricó especímenes cilíndricos de 150 mm de diámetro y 62 mm de altura compactados en el compactador giratorio Superpave, asimismo se sumerge las muestras cilíndricas en un baño de agua a temperatura controlada de 40 °C a 50 °C y se procede a realizar pasadas de la carga

de llanta del equipo, el resultado muestra la profundidad de la huella alcanzada a las 20,000 pasadas.

Figura 17.

Espécimen de 150 mm x 60 mm de altura - ensayo Rueda de Hamburgo.



Fuente: Ensayos realizado por la empresa Casa Asfaltos.

Figura 18.

Procedimiento de ensayo Rueda de Hamburgo.



Fuente: Ensayos realizado por la empresa Casa Asfaltos.

Ensayo Vida de fatiga, ensayo normado por AASHTO T 321, este ensayo nos permite recrear los efectos producidos por el tránsito vehicular sobre el pavimento asfáltico, las probetas son sometidas a deformaciones controladas de 250 us, 300 us, 400 us y 500 us mientras va perdiendo rigidez hasta llegar a un 50% de su rigidez inicial, considerando como el límite de fallo por fatiga. Para el ensayo se aplicó una tensión de 500 microstrain a una temperatura de 20C°, frecuencia de 10 Hz, la rigidez inicial se calculó al

número de ciclos 50 y la rigidez final es el 50% de la inicial y con ello se mide el número de ciclos alcanzados para la condición.

Figura 19.

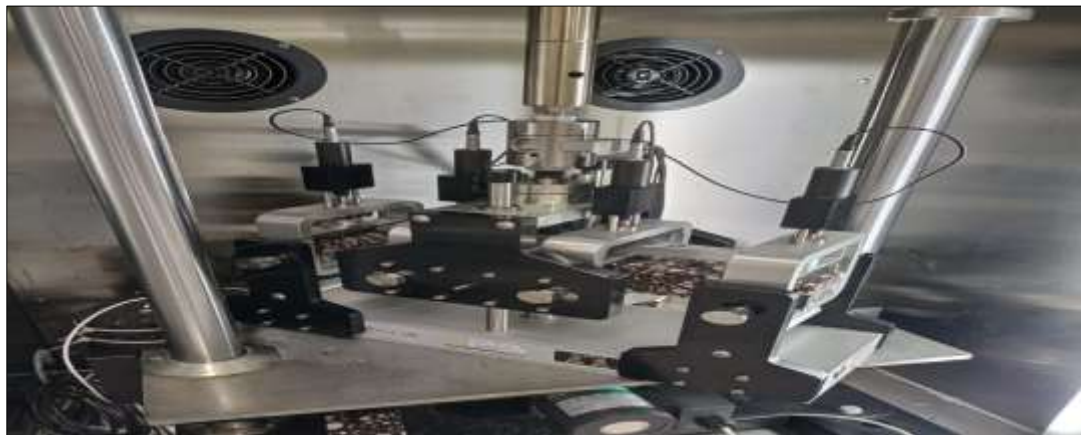
Espécimen – Ensayo Viga de Fatiga



Fuente: Ensayos realizado por la empresa Casa Asfaltos.

Figura 20.

Procedimiento de ensayo de Vida de Fatiga



Fuente: Ensayos realizado por la empresa Casa Asfaltos.

4.2. Análisis de los resultados

De los resultados obtenidos en todos los ensayos de caracterización mecánica y dinámica en la mezcla asfáltica en caliente modificado con polímero SBS muestra que la modificación del asfalto mejora las propiedades reológicas del material, le otorga mejor comportamiento mecánico, aumenta la estabilidad y mantiene el flujo dentro de las especificaciones; parámetros medidos en el ensayo Marshall. Asimismo, en la presente

investigación se planteó como hipótesis cual es el óptimo contenido de asfalto modificado con polímero que satisfaga los parámetros mecánicos y dinámicos con los ensayos realizados.

El asfalto utilizado fue el PEN 85/100 a ello se le incorporo polímero SBS en proporciones de 2.5%, 3.5% y 4.5%, y con lo cual se empezó a verificar con qué porcentaje presenta un mejor desempeño.

En cuanto a estabilidad y flujo se puede evidenciar de acuerdo a la tabla 26, que el óptimo contenido de asfalto es de 5.5% con un 3.5% de polímero, respecto a los otros dos valores, esta tasa de asfalto es relativamente más baja y alcanza valores de estabilidad 1089 kg, a comparación de las tasas de 2.5% y 4.5% que presentan valores de 1066 kg y 1032 kg respectivamente, asimismo, los parámetros de flujo en los tres casos están dentro de las especificaciones pero resalta la tasa de 3.5% de polímero SBS con un valor menor de 12.5 (0.01”).

En cuanto al ensayo de TSR, se evidencia que mejora de propiedades frente al daño por humedad con una tasa de asfalto de 5.5% y 3.5% de polímero SBS, este alcanza valores de 87.8% por encima de las tasas de 2.5% y 4.5% de polímero SBS, que también están dentro del rango, pero existiendo una tendencia en la disminución de la resistencia al daño por humedad con 4.5% ya que arroja resultado de 83.6% que empiezan a alcanzar el valor mínimo del ensayo que es de 80%.

Los resultados para el ensayo de rueda de Hamburgo presentan tendencias diferentes a los ensayos anteriores, en la tabla 28 muestra que, a medida que se va incrementando los porcentajes de polímero SBS en la mezcla asfáltica en caliente va obteniendo una mejora la deformación permanente.

Tabla 28.

Resultados de Rueda de Hamburgo, asfalto modificado con polímero SBS

Parámetros	Unidad	Esp.	% de incorporación de polímero SBS		
			2.50%	3.50%	4.50%
			5.6% OCA	5.5% OCA	5.7% OCA
Rueda de Hamburgo	mm	12 max.	8.07	6.16	3.65

Figura 21.

Deformación vs % de polímero

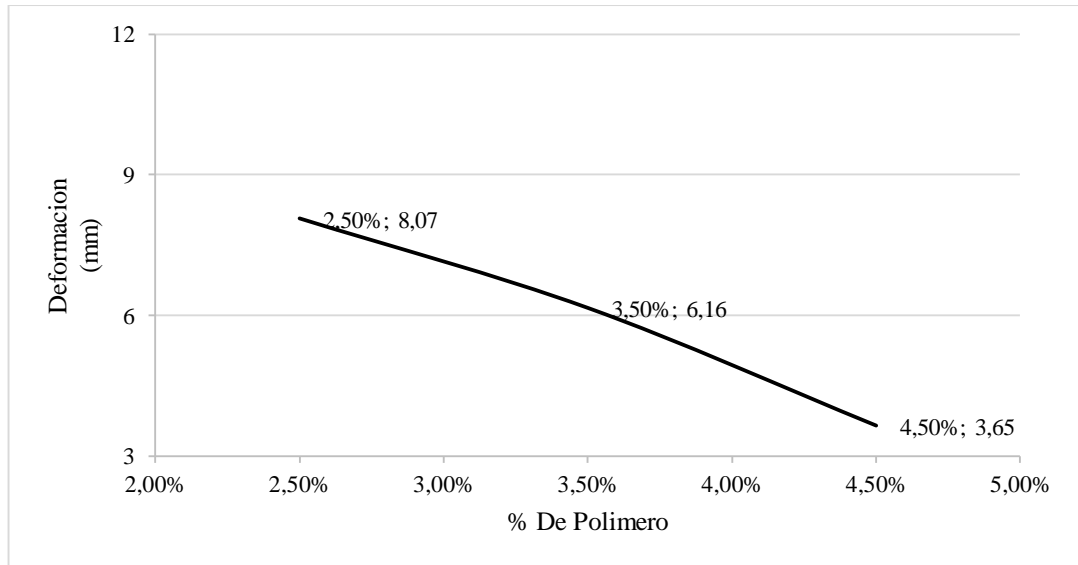
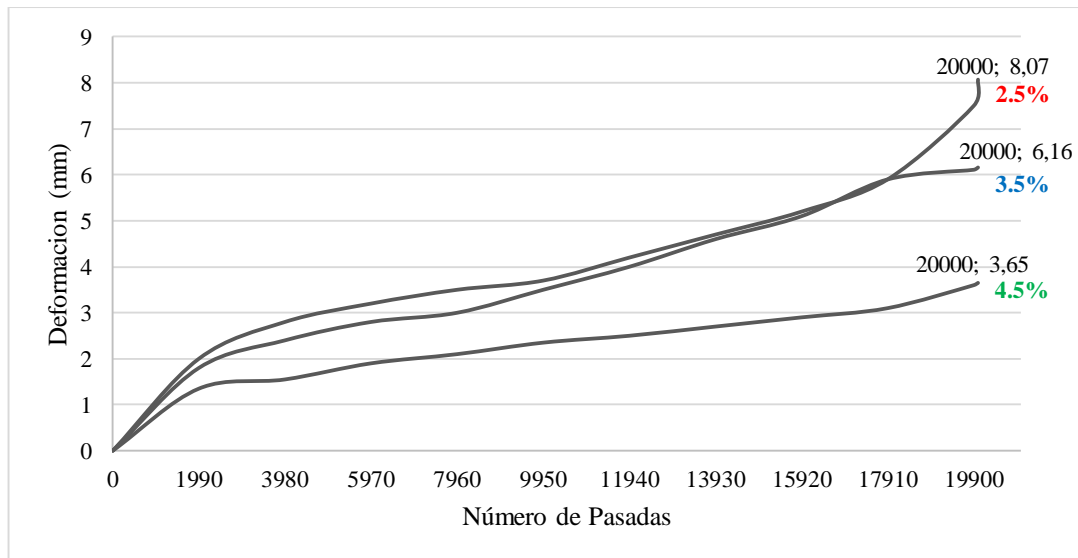


Figura 22.

Deformación vs Numero de pasadas, con incorporación de polímero SBS



Para la mezcla asfáltica modificada con polímero SBS al 4.5% presenta una menor deformación de 3.65 mm respecto a 2.5%, entendiéndose que con todas las dosificaciones de polímero se encuentran dentro de las especificaciones que es de 12 mm.

Los resultados para el ensayo de Viga de Fatiga presentan valores que se muestran en la tabla 29, asimismo la tendencia creciente en los parámetros encontrados asocia un incremento en el número de ciclos alcanzados para una rigidez inicial calculada al número de ciclo 50, los porcentajes de 3.5% a 4.5%, representan mayores valores respecto a 2.5% de polímero SBS alcanzando 1.5 y 2 veces el valor inicial que fue de 695010 repeticiones alcanzadas.

Tabla 29.

Resultados de ensayo de Fatiga, asfalto modificado con polímero SBS

Parámetros	Unidad	Esp.	% de incorporación de polímero SBS		
			2.50% 5.6% OCA	3.50% 5.5% OCA	4.50% 5.7% OCA
			Fatiga		
Rigidez inicial calculado al número de ciclo 50	Mpa	50	2467	1708	2260
Rigidez final	Mpa	50 max.	1233	854	1130
Rigidez de terminación (% de rigidez inicial)	%	50 max.	50	50	50
Numero de ciclos alcanzados	ciclos		695010	1061040	1417090

Contrastación de hipótesis

De acuerdo a la primera hipótesis específica; La incorporación de polímero SBS incrementa la resistencia a fatiga de una mezcla asfáltica en caliente.

Se puede observar en la tabla 29 que, los porcentajes incorporados de polímero SBS a la mezcla en caliente (2.5%, 3.5% y 4.5%) incrementan los valores de fatiga los cuales están dentro de los parámetros expuesto en la AASHTO T-321, existe una tendencia que a mayor tasa de polímero el número de ciclos alcanzados incrementa de 1.5 a 2 veces su valor. Por lo tanto, se acepta la hipótesis específica, ya que, la mezcla asfáltica en caliente

modificada con polímero está cubriendo grandes tasas de deformación que puede ayudar a soportar el incremento desmedido del tránsito.

La segunda hipótesis específica: La incorporación de polímero SBS incrementa la resistencia al ahuellamiento de una mezcla asfáltica en caliente.

Se puede observar en la tabla 28, los resultados obtenidos a partir de la incorporación de polímero SBS en tasas (2.5%, 3.5% y 4.5%), asimismo, existe un incremento en la resistencia a la deformación permanente, ya que, ninguna dosificación alcanza los 12 mm de huella a las 20,000 pasadas, los valores encontrados; 8.07 mm, 6.16 mm y 3.65 mm, evidencia que, si bien es cierto, a mayor incorporación de polímero más allá de 4.5% existe la posibilidad que la deformación tienda a 0, lo cual no sería favorable para la mezcla asfáltica, ya que, al poseer demasiada rigidez se volvería frágil no teniendo esa capacidad de flexibilidad y podría fatigarse a temprana edad. Por lo tanto, se acepta la hipótesis específica ya que con valores por encima de 3.5% de polímero SBS, se está incrementando notablemente la resistencia a la deformación permanente creando mezclas las durables en el tiempo.

La tercera hipótesis específica: La incorporación de polímero SBS incrementa la resistencia al daño por humedad de una mezcla asfáltica en caliente.

Se puede observar que mediante la incorporación de polímero SBS existe un incremento en resistencia frente al daño por humedad, así lo demuestra el ensayo de TSR, para una tasa de asfalto de 5.5% y 3.5% de polímero SBS, alcanza el valor máximo de 87.8%, asimismo, existe una tendencia en la disminución de la resistencia al daño por humedad con 4.5% de polímero SBS, ya que disminuye el TSR al 83.6%, entendiéndose que a mayor porcentaje de polímero la mezcla evidencia una susceptibilidad agresiva frente al daño por humedad. Por lo tanto, se acepta la hipótesis específica ya que con las tres tasas de polímeros alcanza valores de TSR superiores al mínimo especificado que es 80%.

4.3. Discusión de resultados

De acuerdo a la revisión de los antecedentes nacionales e internacionales, se encontraron resultados concordantes con lo desarrollado en la presente investigación. Según

Estrada E., Víctor (2017), menciona que, una mezcla asfáltica se ve afectada por una variabilidad de factores que lo conllevan al fin de su vida útil, como son: la mala caracterización del tráfico vehicular, exceso de cargas, materiales inadecuados frente a climas severos, etc. Por lo general el uso de mezclas modificadas con polímero SBS ofrecerán mejor performance que una mezcla convencional sin modificar, el autor utilizó una granulometría tipo ASTM D 3515 uso D-5, un cemento asfáltico PEN 85/100, polímero SBS Bitutec mayor al 3% grado PG-70-28. Comparo el diseño de una mezcla patrón PEN 85/100 sin incorporación de polímero SBS y la otra con incorporación de polímero de SBS >3%, en cuanto a la estabilidad y flujo sin polímero alcanza valores de 1382 kgf y flujo de 14 mm, con polímero se incrementó los valores a 2047 kgf y flujo de 14.10 mm, en cuanto a los parámetros de Resistencia a la deformación permanente los valores son, sin polímero 12.5 mm y con polímero 3.79 mm respectivamente, los valores en fatiga son, sin polímero 186223 ciclos o aplicaciones de carga y con polímero 3244490 ciclos o aplicaciones de carga.

Existe una similitud sobre los resultados encontrados por el autor y la presente investigación, ya que, la investigación que propone el autor, incorpora el polímero SBS mayor al 3%, dado que es el rango del PG 70-28 del asfalto modificado, sin embargo, no ha especificado realmente el porcentaje de polímero utilizado, ya que, se evidencia que el flujo medido en parámetros Marshall está sobrepasando las especificaciones, por lo tanto la mezcla asfáltica estaría fuera de los valores especificados en las EG-2013 evidenciando demasiada rigidez, lo cual podría conllevar a problemas de agrietamiento prematuro al ser una mezcla demasiado rígida. En contraste con la presente investigación desarrollada se evidencian valores mayores de 4.5% de incorporación de polímero SBS, producen demasiada rigidez en la mezcla asfáltica, existiendo una tendencia de un buen comportamiento a la deformación permanente, fatiga y resistencia al daño por humedad con incorporaciones entre 2.5% a 3.5% de polímero SBS.

Según Ortiz Hernández E. et al (2017), el autor realiza la siguiente investigación para asfaltos modificados, propuso la modificación del asfalto convencional tipo PEN 60/70 con un polímero al 3% de tipo Butonal NX 1138 de tipo elastómero, el material granular tiene un Huso granulométrico D-5 ASTM D 3515, asimismo, sometió a los ensayos Marshall correspondientes y encontró valores respecto a una muestra patrón sin modificar. Para la

muestra sin modificar encontró valores de óptimo contenido de asfalto 6.4% y modificada 6.5%, los resultados de la estabilidad arrojó 2238 lb sin modificar, mientras modificado alcanzó 2662 lb, para dosificaciones con incorporación de polímero SBS en tasas de 2.5 %, 3 %, 3.5% podemos encontrar resultados estables sin llegar a rigidizar excesivamente la mezcla asfáltica. Los resultados encontrados y comparados con la investigación desarrollada son valores normales en comparación con la estabilidad, no evidencia comportamiento en el flujo y eso haría pensar que la mezcla supera los valores establecidos.

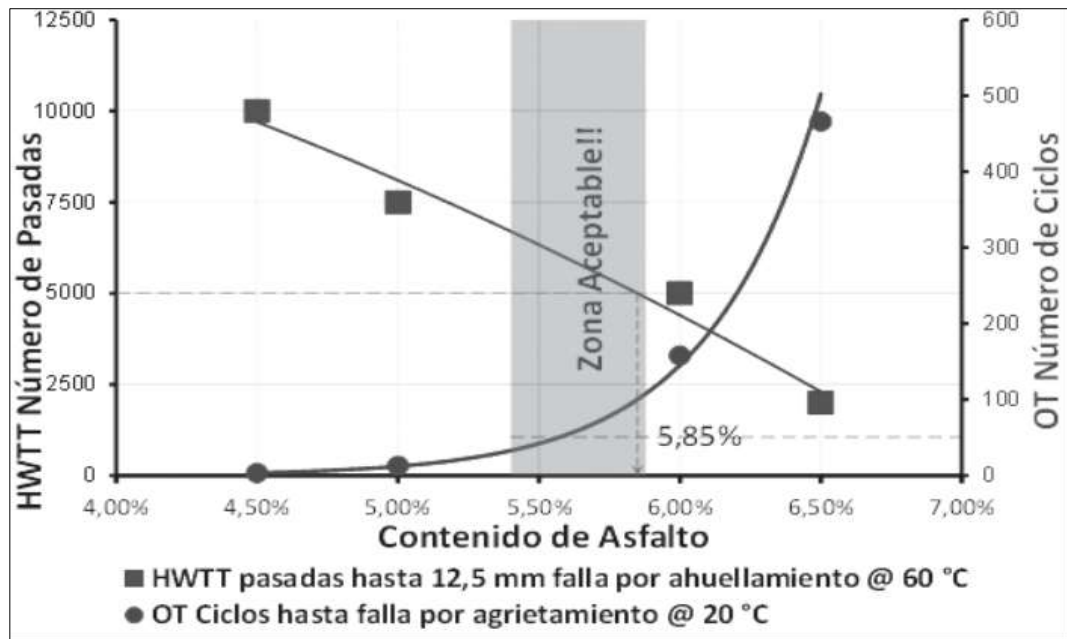
Según R. Alabasey. Et al (2015), los autores encontraron un incremento de propiedades reológicas del asfalto al modificar con polímero del tipo plastomero SUPERPLAST, los porcentajes fueron: (2%, 3%, 4%, 5% y 6%), el uso granulométrico que utilizaron fue, piedra chancada $\frac{3}{4}$ "-1/2" 63%, arenas 31% y filler 6%. Las dosificaciones de asfalto PEN 60/70 fueron de 4.5% a 6.5%. los resultados encontrados fue que mejoró a partir del 3% de incorporación de polímero de tipo plastomero, alcanzando un valor máximo con 4% 1800 kg y un flujo de 2.77, para el ensayo de TSR se evaluó con respecto al 4% de incorporación de polímero y evidenció una mejora a la resistencia al daño por humedad incrementando del 53.1% al 71.5%. En comparación con la investigación desarrollada se tienen tendencias similares ya que a partir de incorporación de 3% hasta el 4% de polímero ofrece un mejor comportamiento a las acciones severas del tránsito, podríamos concluir que incorporación por encima de 4.5% de polímero rigidiza la mezcla haciéndola susceptible a un agrietamiento por exceso de rigidez y un tiempo prematuro de vida útil.

Y.F López, L.E. Sanabria, R. Carreño (2012), ensayaron mezclas asfálticas en caliente con asfaltos de grado PG 64-70 y 76, para verificar que porcentaje óptimo de asfalto contrarresta la deformación permanente (ahuellamiento) y fatiga, mediante los ensayos de Marshall, Rueda de Hamburgo y Overlay Tester. Los resultados que obtuvieron fue que las mezclas con grado PG 66-22 en el ensayo rueda de Hamburgo a 10,000 pasadas con un 4.5% de contenido de asfalto inicial, se puede considerar aceptable, asimismo, a bajos contenidos de asfalto 4.5% y 5.0% son altamente susceptibles al daño por humedad o desprendimiento del ligante asfáltico de la superficie del agregado mineral con lo cual presentaría un potencial de baches prematuramente, para contenidos de asfalto superiores a 6.0% y 6.5% presente un

excesivo ahuellamiento. La investigación muestra que para diferentes niveles de carga para el ensayo de OT entre 200 ciclos y 300 el contenido de asfalto varía 6.1% a 6.1%, si se considera una cantidad de pasadas de carga en el ensayo de rueda de Hamburgo de 5000 a 7500 o 10,000 pasadas, el ligante asfáltico varía de 5 % a 6%, con una aceptación poco tolerable de 4.5%.

Figura 23.

Óptimo contenido de asfalto a través de ensayos de desempeño



Fuente: Y.F López, L.E. Sanabria, R. Carreño (2012)

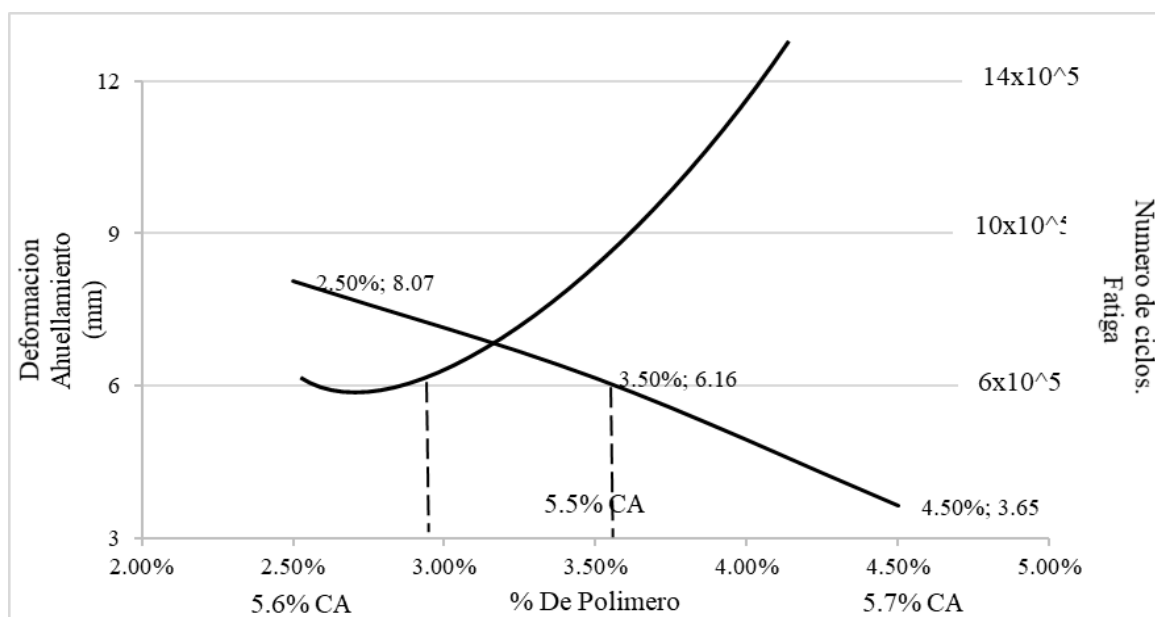
En tal sentido la investigación propuesta por los autores, recaería en la utilización con un mínimo de 5.3% de contenido de asfalto con grado PG 66-22, estaría cumpliendo el requerimiento para obtener una mezcla balanceada que satisfaga parámetros de fatiga y ahuellamiento.

En cuanto a la investigación propuesta de acuerdo a la figura 24, se tendría un rango de trabajo para la incorporación de polímero SBS 3.0% al 3.6%, ya que se evidencia que mejora el comportamiento a fatiga y ahuellamiento, por otro lado, se debe entender que, el óptimo contenido de asfalto se obtuvo a través del ensayo de Marshall, los valores 5.6%, 5.5% y 5.7% de cemento asfáltico son tasas moderadas y ampliamente trabajables. Con estos valores se obtienen parámetros de estabilidad y flujo superiores al de una mezcla

convencional sin modificar, el TSR con tasas de entre 3% a 3.5% se mantiene estable por encima de 86%, los valores de ahuellamiento están el orden de 7 a 6 mm y la fatiga supera ampliamente el millón de repeticiones.

Figura 24.

Optimo contenido de asfalto y polímero vs Ahuellamiento y Fatiga.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

1. De acuerdo a los resultados encontrados se concluye que, al incorporar el polímero SBS a la mezcla asfáltica en caliente mejora las propiedades mecánicas de la mezcla. La investigación incorporo al asfalto tasas de polímero SBS 2.5%, 3.5% y 4.5%, con las tres tasas se puede observar notablemente un incremento en la resistencia en fatiga, los numero de ciclos alcanzados incrementan de 1.5 a 2 veces el valor, 1061040 y 1417090 respectivamente. Por lo que se puede utilizar tasas de polímero entre 3% a 3.5%, sin llegar a rigidizar en exceso la mezcla asfáltica, entendiendo que los valores iniciales de fluencia para estas tasas están en el orden de 13.3 a 12.5.
2. Al incorporar el polímero SBS al asfalto incrementa la resistencia a la deformación permanente por ahuellamiento, a las 20,000 pasadas especificadas en el ensayo T 324 alcanza valores de 8.07 mm, 6.16 mm y 3.65 mm, estando por debajo de lo especificado que es 12.00 mm. Entendiendo de que tasas superiores a 4.5% de polímero SBS, demandarían mayor rigidez en la mezcla lo cual podría iniciar un resquebrajamiento o fisuras a temprana edad. Por lo que con tasas menores a 3.5% estarían dentro de los parámetros establecidos, entendamos también que, de acuerdo a los antecedentes encontrados, este ensayo puede realizarse con número de ciclos de carga entre las 7000 pasadas y 10,000 pasadas lo que conllevaría a tasas menores de asfalto y en consecuencia tasas menores por debajo de 3% en polímero SBS.
3. La resistencia al daño por humedad medida con el ensayo TSR, muestra valores con una tendencia a un descenso en la resistencia para una tasa de asfalto de 5.5% y 3.5% de polímero SBS alcanza un valor máximo de 87.8%, asimismo con 4.5% de polímero disminuye el TSR a 83.6%, evidenciando que a mayor porcentaje de polímero la mezcla evidencia una susceptibilidad agresiva frente al daño por humedad, esto debido a que la mezcla en este ensayo, está sometido a ciclos de congelamiento y al incorporar mayor porcentaje de polímero lo que se estaría alcanzando una rigidez en exceso convirtiéndola más frágil.
4. Los resultados iniciales del ensayo Marshall muestran valores de estabilidad y flujo conforme la normativa exige, asimismo, se puede inferir rápidamente la tasa de

asfalto con el que se va a trabajar, los cuales otorguen trabajabilidad a la mezcla. Los valores encontrados fueron de 5.6%, 5.5% y 5.7% con tasas de polímero SBS de 2.5%, 3.5% y 4.5%, el indicativo inicial que nos da el ensayo Marshall es una mejora en las propiedades a la estabilidad de la mezcla (resistencia), ahora, los valores en flujo están por encima de 12, lo cual haría pensar que la mezcla es susceptible a falla por repeticiones de carga o no trabaje de manera adecuada en climas con temperaturas extraordinarias para las cuales fue concebida entendiéndose que se eligió un PEN 85/100 que cubre temperaturas 15°C a -5°C. Si bien es cierto, el incremento en las propiedades reológicas mejora al incorporar polímero de tipo SBS, y esto se comprueba en los ensayos de desempeño (fatiga y ahuellamiento), no obstante, se debe tener en consideración que las tasas de aplicación deben ser las adecuadas para un mejor comportamiento de la mezcla en su conjunto, ya que hoy en día el parámetro de control más utilizado en nuestro país es el Marshall, pero sin duda, la tecnología en pavimentos ofrece otras posibilidades de visualizar mejor el desempeño que pueda tener el pavimento en su vida útil de servicio mediante ensayos sofisticados. Con las tasas incorporadas de polímero SBS encontramos un rango de PG entre 64 a 70 y -10 a -28, teniendo una gama de utilización para las temperaturas mencionadas, esto recae en la correcta selección del ligante por grado de desempeño y un control minucioso al proveedor de cemento asfáltico que cumpla dichas exigencias. En tal sentido la investigación realizada, recaería en la utilización de un mínimo de 5.5% de asfalto y de 3% a 3.5% de polímero SBS, con lo cual estaría cumpliendo el requerimiento para obtener una mezcla balanceada que satisfaga parámetros de fatiga y ahuellamiento.

5. El diseño por el método estático Marshall (Estabilidad-Flujo) que define criterios volumétricos en el diseño de una mezcla asfáltica en caliente; sometido a pruebas desempeño dinámico (Rueda de Hamburgo y Viga de Fatiga), puede permitir ajustar el contenido de componentes de la mezcla, buscando prever un mejor comportamiento y durabilidad en su vida útil; además de permitir incorporar polímeros y otros materiales adicionales en la estructura de carpeta de rodadura que si pueden ser sometidos a estas pruebas de desempeño.

Recomendaciones

1. Utilizar incorporaciones de tasas de polímero entre 3% a 3.5%, ya que con ello se estaría garantizando un balance de la tasa de asfalto que ofrezca un PG adecuado para la zona del proyecto y así, cubra las necesidades de garantizar mejores parámetros de diseño Marshall, TSR y un comportamiento adecuado a fatiga y ahuellamiento medidos en parámetros Superpave. Tasas de polímero por encima de 4.5% podrían convertir una mezcla rígida que pueda llegar a presentar fisuras prematuras por un aumento excesivo de rigidez y no garantizando la durabilidad de la Mezcla Asfáltica en Caliente.
2. Realizar más investigaciones, en mezclas asfálticas modificadas con polímeros sometidas a pruebas de desempeño; teniendo en cuenta y como referencia los resultados encontrados en la presente investigación, manipulando otras variables como los agregados incorporados en sus diferentes gradaciones que se encuentran especificadas en las normativas técnicas; ello nos permitiría conocer los porcentajes óptimos de polímeros en una mezcla para las diferentes especificaciones a nivel de agregados.
3. Se recomienda que los ensayos de caracterización al asfalto deban ser más complejos, a fin, de garantizar un rango de temperatura que cubra un proyecto en su totalidad a lo largo de su vida útil, se recomienda realizar ensayos; como el modulo complejo G^* , ángulo de fase δ , viscosidad η^* y pruebas de creep para determinar la deformación en función del tiempo, ensayos de envejecimiento prematuro, etc.
4. Se recomienda incorporar más centros de investigación en las universidades con los equipos de última generación en pavimentos, a fin de estudiar los diferentes tipos de modificadores de asfalto, ya que, en la actualidad está observando la tendencia en la mejora a las propiedades reológicas, asimismo, existen estudios amplios sobre los polímeros de tipo SBS que son los elastómeros, pero existe pocas investigaciones a nivel mundial sobre la utilización de los polímeros de tipo plastomeros, hay una gama de posibilidades en cuanto a los polímeros de todo tipo para modificar las propiedades reológicas del asfalto y contribuir al desarrollo de nuestra vialidad en el país. Tener carreteras nivel de carpeta asfáltica en caliente que ofrezcan una vida útil duradera y que resistan adecuadamente a fatiga y ahuellamiento que son los problemas más

frecuentes que se ven en nuestros pavimentos. Entendiendo también que dichas modificaciones poliméricas al asfalto, deben generar tasas de asfalto competitivas y no incrementar en sobremanera los costos de la inversión, para poder tener competitividad en la operación y mantenimiento a largo plazo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amirhossein Norouzi, (2015), *Investigation of Specimen Geometries for the VECD Model and Calibration of the LVECD Program for Fatigue Cracking Performance of Asphalt Pavements*, (Tesis para optar el grado de Doctor en Filosofía Ingeniería Civil). *State University North Carolina*.
- Bjorn Birgisson & Gabriele Tebaldi, Et Al (2011), *Strain Localization and Damage Distribution in SBS Polymer Modified Asphalt Mixtures*, *REVISTA ROAD MATERIALS AND PAVEMENT DESIGN, VOLUMEN 11*, p.899-915.
- David Newcomb and Fujie Zhou (2018), *Balance Design of Asphalt Mixtures*, *Texas A&M Transportation Institute Virginia, Research Project, No.of. Pages. 68*.
- Dávila M. Juan Manuel (2005), *Análisis Comparativo de Modulo Resiliente y Ensayos de Deformación Permanente en Mezclas Asfálticas del Tipo (MDC2) en Briquetas Compactadas con Martillo Marshall y Compactador Giratorio*, (Tesis para optar el grado de ingeniero). *Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá*.
- Duijia Zhao. Et Al (2009), *Evaluation of Polymer-Modified Hot-Mix Asphalt: Laboratory Characterization*, *REVISTA ournal of Materials in Civil Engineering Vol. 21, Issue 4*.
- Estrada Escalante, Víctor R. (2017), *Estudio y Análisis de Desempeño de la Mezcla Asfáltica Convencional PEN 85/100 Plus y Mezcla Asfáltica Modificada con Polímero Tipo SBS PG 70 – 28*. (Tesis para obtener el grado de Ingeniero Civil), *Universidad Andina del Cusco, Cusco – Perú*.
- Fabio Pereira Rossato, (2015), *Avalicao Do Fenomeno De Fadiga e Das Propiedades Elasticas De Misturas Asfalticas Com Diferentes Ligantes Em Variadas Temperaturas*, (Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Civil). *Universidad Federal de Santa María Centro de Tecnología. Santa María – Brasil*.
- Fabri Meroni., Gerardo W. Flintsch, Et Al. (2020), *Application of Balanced Mix Design Methodology to Optimize Surface Mixes with High-RAP Content Virginia*. *REVISTA MATERIALS 2020, TOMO. 13 N°24, p.5638*.
- George Arias, W. (2013). *Mezclas Asfálticas*. Recuperado de <http://es.slideshare.net/leonel321/mezclas-asfalticas-2>.

- Hugo A. Rondón Q., Fredy A. Reyes L. (2012), *Evaluación de los Parámetros Mecánicos de una Mezcla Asfáltica Sometidas a las Condiciones Ambientales de la Ciudad de Bogotá*. *REVISTA DE INGENIERIA Y CONSTRUCCION*, VOL. 27 N°01, p.57-p.74.
- I. Amin, R. Alabasey, A. Azam. Et Al (2016), *Evaluation of Polymer Modified Asphalt Mixtures in Pavement Construction*, *REVISTA MANSOURA ENGINEERING JOURNAL*, (MEJ), VOL. 40, Issue 4.
- Jonatan Vera Silva (2012), *Caracterización de las Mezclas Asfálticas por su Resistencia a Fatiga por Flexión*. (Tesis para optar el grado de ingeniero). *Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá*.
- Maila Paucar, M. E. (2013). *Comportamiento De Una Mezcla Asfáltica Modificada Con Polímero Etileno Vinil Acetato (EVA)*, (Tesis para optar el grado de ingeniero). Universidad Central del Ecuador, Quito: UCE.
- Marcio L. Pinto (2013), *Estudo Preliminar de Misturas Asfálticas a Quente Utilizadas Em Obras de Pavimentacao na Regiao Metropolitana de Goiania*. (Trabajo de conclusión como requisito para obtener el grado Ciencias de Ingeniería Civil), Universidad Federal de Goias.
- Martínez Hernández, O. (2014). *Comportamiento de la mezcla asfáltica a diferentes niveles de compactación*, (Tesis maestría). Universidad Autónoma de México, Mexico D.F.
- Mohammadvoriya Khordehbinan, Et Al (2017), *The effect of nano-SiO₂ and the styrene butadiene styrene polymer on the high-temperature performance of hot mix asphalt*, *REVISTA PETROLEUM SCIENCE AND TECHNOLOGY 2017*, VOLUMEN 35, p.553-560.
- Paulo R, Borges (2019), *Estudo do Comportamento Mecanico de Misturas Asfálticas a Quente Analisadas Pelos Metodos De Dosagem Marshall y Superpave*, (Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias en Ingeniería Civil), Universidad Federal de Vicosa. Minas Gerais, Brasil.
- Reyhaneh Rahbar-Rastegar (2017), *Cracking in Asphalt Pavements: Impact of Component Properties and Aging on Fatigue and Thermal Cracking*. (Tesis para obtener el grado de Doctor de Filosofía en Ingeniería Civil), University of New Hampshire, Virginia.
- Reyhaneh Rahbar-Rastegar. (2017), *Cracking In Asphalt Pavements: Impact Of Component Properties And Aging On Fatigue And Thermal Cracking* (Tesis para optar el grado de Doctor en Filosofía Ingeniería Civil). *University of New Hampshire*.

Sahand Sasha Karimi (2009), *Increasing Durability of Hot Mix Asphalt Pavements Designed with the Superpave System*, (Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias de Ingenieria). University of Maryland, College Park. Maryland.

Sandra P. Roncallo C., Freddy Bautista R. (2013), *Desempeño a Fatiga y Ahuellamiento de Mezclas en Servicio en la Ciudad de Bogotá, Comparadas con Mezclas Envejecidas en Laboratorio en Cámara UV* (Tesis para optar el grado de maestro en ingeniería). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.

Vanderlei D. Da Silva (2019), *Avalicao da Deformacao Permanente de Misturas Estabilizadas Com Asfalto*, (Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias de Ingenieria de Transportes). Escola Politecnica de Universidade de Sao Paulo. Sao Paulo – Brasil

Y.F López, L.E. Sanabria, R. Carreño (2012), *Comparación del Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente por el Método Marshall y por el Método de Diseño Balanceado por Desempeño*. CORPORACION PARA LA INVETIGACION Y DESARROLLO EN ASFALTOS EN EL SECTOR TRANSPORTE E INDUSTRIAL – CORASFALTOS, Bucaramanga.

ANEXOS

- Anexo 1: Matriz de consistencia
- Anexo 2: Determinación de peso específico y absorción de agregados finos
- Anexo 3: Densidad relativa gravedad especifica en agregados gruesos
- Anexo 4: Análisis granulométrico de los agregados
- Anexo 5: Mezcla de agregados MAC-2 y Granulometría ASTM D3515 huso D5
- Anexo 6: Panel fotográfico del ensayo Marshall
- Anexo 7: Procedimiento y resultados ensayo Marshall al 2.5% de polímero SBS
- Anexo 8: Procedimiento y resultados ensayo Marshall al 3.5% de polímero SBS
- Anexo 9: Procedimiento y resultados ensayo Marshall al 4.5% de polímero SBS
- Anexo 10 Panel fotográfico ensayo de Rueda de Hamburgo
- Anexo 11: Resultados de ensayo de Rueda de Hamburgo 2.5% SBS
- Anexo 12: Resultados de ensayo de Rueda de Hamburgo 3.5% SBS
- Anexo 13: Resultados de ensayo de Rueda de Hamburgo 4.5% SBS
- Anexo 14: Panel fotográfico ensayo de Fatiga.
- Anexo 15: Resultados de ensayo de Fatiga 2.5% de polímero SBS.
- Anexo 16: Resultados de ensayo de Fatiga 3.5% de polímero SBS.
- Anexo 17: Resultados de ensayo de Fatiga 4.5% de polímero SBS
- Anexo 18: Resultados de TSR - AAHTO T-283 2.5% de polímero SBS
- Anexo 19: Resultados de TSR - AAHTO T-283 3.5% de polímero SBS
- Anexo 20: Resultados de TSR - AAHTO T-283 4.5% de polímero SBS
- Anexo 21: Resultados de ensayo Rueda de Hamburgo general
- Anexo 22: Resultado de ensayo de Fatiga general
- Anexo 23: Resultado de ensayo de TSR general

