



UNIVERSIDAD RICARDO PALMA

ESCUELA DE POSGRADO

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

**Mezcla asfáltica altamente modificada con polímeros elastómero
termoplástico sintético para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas**

TESIS

Para optar el Grado Académico de Maestro en Ingeniería Vial con mención en
Carreteras, Puentes y Túneles

AUTOR

Bachiller Rosales Navarro, Tulio (0000.0001.9323.695X)

ASESOR

Doctor Chavarry Vallejos, Carlos Magno (0000.0003.0512.8954)

Lima, Perú

2022

Metadatos Complementarios

Datos de autor

Rosales Navarro, Tulio

Tipo de documento de identidad del AUTOR: DNI

Número de documento de identidad del AUTOR: 20714378

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

Presidente : Doctor Valencia Gutiérrez, Andrés Avelino

Miembro : Doctor Tamara Rodríguez, Joaquín Samuel

Miembro : Doctor Altamirano Herrera, Aníbal

Asesor : Doctor Chavarry Vallejos, Carlos Magno

DEDICATORIA

Dedico la presente tesis a mi madre que siempre está conmigo y a mi padre en el cielo, que siempre me enseñaron el concepto de perseverar, a mis hermanos que son mis compañeros de vida, a mi esposa, también a mis amigos y colegas de la universidad, por compartir sus experiencias en los proyectos los cuales contribuyeron en mi desarrollo personal y profesional.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, a Dios, por darnos fuerzas y motivarnos cada día.

A nuestra Universidad Ricardo Palma por todos los vivencias, valores y conocimientos proporcionados a lo largo de la maestría.

A mi asesor Dr. Carlos Magno Chavarry Vallejos, por su apoyo a lo largo del desarrollo de esta investigación.

INDICE GENERAL

INDICE GENERAL	I
LISTADO DE TABLAS.....	IV
LISTADO DE FIGURAS.....	VI
RESUMEN	VIII
ABSTRACT.....	IX
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1 DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA.....	3
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	4
1.2.1 <i>Problema general.</i>	4
1.2.2 <i>Problemas específicos.</i>	4
1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	5
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	5
1.4 DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	6
1.4.1 <i>Geográfica</i>	6
1.4.2 <i>Temporal</i>	6
1.4.3 <i>Temática</i>	6
1.4.4 <i>Muestral</i>	6
1.5 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	7
1.5.1 <i>Conveniencia</i>	7
1.5.2 <i>Relevancia social</i>	7
1.5.3 <i>Aplicaciones practicas</i>	7
1.5.4 <i>Utilidad metodológica</i>	7
1.5.5 <i>Valor teórico</i>	8
1.6 IMPORTANCIA DEL ESTUDIO.....	8
1.6.1 <i>Nuevos conocimientos</i>	8
1.6.2 <i>Aporte</i>	8
1.7 LIMITACIONES DEL ESTUDIO.....	9
1.7.1 <i>Falta de estudios previos de investigación</i>	9
1.7.2 <i>Metodológicos o prácticos</i>	9
1.7.3 <i>Medidas para la recolección de datos</i>	9
1.7.4 <i>Obstáculos en la investigación</i>	10
1.8 ALCANCE	10

1.9 VIABILIDAD DEL ESTUDIO.....	10
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO.....	11
2.1 MARCO HISTÓRICO	11
2.2 INVESTIGACIONES RELACIONADAS CON EL TEMA.....	11
2.2.1 <i>Antecedentes internacionales</i>	11
2.2.2 <i>Antecedentes nacionales</i>	14
2.3 INVESTIGACIONES RELACIONADAS CON EL TEMA.....	18
2.4 ESTRUCTURA TEÓRICA Y CIENTÍFICA QUE SUSTENTA EL ESTUDIO	24
2.5 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	40
2.6 FUNDAMENTOS TEÓRICOS QUE SUSTENTAN LA HIPÓTESIS (MAPA CONCEPTUAL)	42
CAPÍTULO 3 SISTEMA DE HIPÓTESIS	43
3.1 HIPÓTESIS	43
3.1.1 <i>Hipótesis general</i>	43
3.1.2 <i>Hipótesis específicas</i>	43
3.2 SISTEMA DE VARIABLES	44
3.2.1 <i>Definición conceptual y operacional</i>	44
3.2.2 <i>Operacional de variables</i>	44
CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA	46
4.1 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.....	46
4.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	47
4.3 NIVEL DE INVESTIGACIÓN.....	47
4.4 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	48
4.5 POBLACIÓN Y MUESTRA.....	49
4.5.1 <i>Población</i>	49
4.5.2 <i>Muestra</i>	49
4.6 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	51
4.6.1 <i>Técnicas</i>	51
4.6.2 <i>Instrumentos</i>	52
4.7 DESCRIPCIÓN DE PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE DATOS	52
5.0 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	63
5.1 RESULTADOS	63
5.1.1 <i>Comportamiento de la resistencia a la deformación de la mezcla asfáltica en caliente mediante el ensayo Marshall</i>	63
5.1.3 <i>Módulo de resiliente de la mezcla asfáltica altamente modificada con polímeros elastómero termoplástico sintético</i>	84

5.1.3 Comportamiento de la resistencia al ahuellamiento permanente de las mezclas asfálticas mediante el ensayo de Rueda Cargada	87
5.1.4 Comportamiento de la resistencia a la Fatiga de mezclas asfálticas altamente modificada mediante ensayo de flexión de viga en cuatro puntos.....	94
5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS (DISCUSIÓN DE RESULTADOS).....	97
5.2.1. Análisis de Marshall.....	97
5.2.2. Análisis de resultados elasticidad.....	98
5.2.3. Análisis de resultados de la deformación permanente	99
5.2.4. Análisis de resultados de la resistencia a la fatiga	100
5.3 CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS.....	100
5.3.1. Hipótesis general.....	101
5.3.2 Hipótesis específica 01.....	101
5.3.3 Hipótesis específica 02.....	104
5.3.4 Hipótesis específica 03.....	106
5.3.5 Hipótesis específica 04.....	109
5.4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	110
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	113
CONCLUSIONES.....	113
RECOMENDACIONES.....	116
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117
ANEXOS	120

Listado de tablas

Tabla 1 Operacionalización de variables	43
Tabla 2 Número de muestras para determinar el contenido óptimo de asfalto y polímero para el ensayo Marshall – MTC E 504.	48
Tabla 3 Número de muestras para el ensayo de Modulo Resilente	48
Tabla 4 Número de muestras para el ensayo de Rueda Cargada de la mezcla asfáltica altamente modificada – AASTHO T 324.	49
Tabla 5 Número de muestras para el ensayo de Flexión de Viga en Cuatro Puntos	49
Tabla 6 Resultado de ensayo de caracterización del cemento asfáltico PEN 60/70	62
Tabla 7 Requerimiento para el agregado grueso	63
Tabla 8 Gradación del agregado grueso TM 3/4"	64
Tabla 9 Gradación del agregado grueso TM 1/2"	64
Tabla 10 Verificación de las características físicas del agregado grueso	65
Tabla 11 Requerimientos para el agregado fino	66
Tabla 12 Gradación del agregado grueso TM 1/2"	66
Tabla 13 Verificación de la característica física del agregado fino	67
Tabla 14 Porcentajes de los agregados para el diseño de Huso MAC-2	68
Tabla 15 Combinación teórica de los agregados (Huso MAC-2.)	68
Tabla 16 Características técnicas de LG LUPRENE 501	69
Tabla 17 Resultado de diseño Marshall de la mezcla asfáltica convencional.	71
Tabla 18 Requerimiento y resultado del diseño Marshall de la mezcla asfáltica convencional.	71
Tabla 19 Resultados del diseño Marshall de la mezcla asfáltica con 7.5 % de polímero elastómero termoplástico sintético.	75
Tabla 20 Resultado del diseño Marshall con C.A óptimo con 7.5% polímeros polímero elastómero termoplástico sintético.	76
Tabla 21 Resultados del diseño Marshall de la mezcla asfáltica con 8.0 % de polímero elastómero termoplástico sintético.	77
Tabla 22 Resultado del diseño Marshall con C.A. optimo con 8.0 % de polímero elastómero termoplástico sintético.	77
Tabla 23 Resultado de diseño Marshall de la mezcla asfáltica con 8.5 % de polímero elastómero termoplástico sintético.	78
Tabla 24 Resultado del diseño Marshall con C.A. optimo con 8.5 % de polímero elastómero termoplástico sintético.	79
Tabla 25 Módulo resiliente de la mezcla asfáltica altamente modificada con 7.5% de polímero elastómero termoplástico sintético – espécimen.	83

Tabla 26 Módulo resiliente de la mezcla asfáltica altamente modificada con 8.0% de polímero elastómero termoplástico sintético – espécimen.	84
Tabla 27 Módulo resiliente de la mezcla asfáltica altamente modificada con 8.5% de polímero elastómero termoplástico sintético – espécimen.	85
Tabla 28 Daño por humedad de la mezcla asfáltica altamente modificada con polímero elastómero sintético.	88
Tabla 29 Requisito de Adherencia.	89
Tabla 30: Resumen de resultado de elasticidad - ensayo módulo resiliente.	97
Tabla 31 Resultado del ensayo de rueda cargada de Hamburgo.	98
Tabla 32 Condición de término del Ensayo Flexión de viga en 4 puntos.	99
Tabla 33 Análisis de T Student de la Estabilidad.	102
Tabla 34 Datos de análisis de T Student.	102
Tabla 35 Análisis experimental del módulo resiliente.	103
Tabla 36 Análisis de T student de resistencia al ahuellamiento permanente de la mezcla asfáltica.	105
Tabla 37 Datos estadísticos según tamaño de muestra de resultados.	106

Listado de figuras

Figura 1 Propagación de grietas a través de capas de asfalto, a) con ligante modificado con polímero típico, b) con aglutinante altamente modificado.	28
Figura 2 Efecto del aumento del contenido de polímero SBS sobre la morfología del polímero /asfalto.	30
Figura 3. Equipo de ensaye a fatiga a flexión en 4 puntos.	36
Figura 4 Principios básicos del ensayo a flexión en cuatro puntos.	37
Figura 5 – Mapa Conceptual.	40
Figura 6 Prueba de módulo resiliente según la norma ASTM D4123-82.	55
Figura 7. Curva de Hamburgo (Rueda cargada) con parámetro de prueba.	57
Figura 8 Probeta primatica (pesado y dimensionamiento).	60
Figura 9 Gradación del agregado grueso.	64
Figura 10 Gradación del agregado grueso .	65
Figura 11 Gradación del agregado fino.	67
Figura 12 Gradación de los agregados combinados.	69
Figura 13. Agregados y polímero sbs.	72
Figura 14. Proceso de calentamiento y mezclado.	73
Figura 15 Variación de estabilidad en relación al % de Polímeros con 75 golpe.	80
Figura 16 Variación del flujo en relación al % de Polímero con 75 golpes.	81
Figura 17 Variación del índice de rigidez de las mezclas asfálticas.	82
Figura 18. Núcleos de especímenes de la mezcla asfáltica altamente modificada con 8.0% de polímero elastómero termoplástico sintético – Después de la prueba de Rueda Cargada.	89
Figura 19 Núcleo de espécimen de la mezcla asfáltica altamente modificada con 7.5% de polímero elastómero termoplástico sintético – Después de la prueba de Rueda Cargada.	90
Figura 20 Núcleos de especímenes de la mezcla asfáltica altamente modificada con 8.0% de polímero elastómero termoplástico sintético – Después de la prueba de Rueda Cargada.	91
Figura 21 Núcleo de espécimen de la mezcla asfáltica altamente modificada con 8.5% de polímero elastómero termoplástico sintético – Después de la prueba de Rueda Cargada.	91
Figura 22 Curva de variación de desgaste de la prueba de Rueda Cargada.	92
Figura 23 Núcleos de especímenes de la mezcla asfáltica convencional después de la prueba de Flexión de Viga en Cuatro Puntos.	93
Figura 24 Núcleos de especímenes de la mezcla asfáltica altamente modificada con 7.5% de polímero elastómero termoplástico sintético – Después de la prueba Flexión de Viga en Cuatro Puntos.	92

Figura 25 Núcleos de especímenes de mezcla asfáltica altamente modificada con 8.0 % de polímero elastómero termoplástico sintético – Después de la prueba de Flexión de Viga en Cuatro Puntos.	94
Figura 26 Núcleos de especímenes de mezcla asfáltica altamente modificada con 8.5 % de polímero elastómero termoplástico sintético – Después de la prueba de Flexión de Viga en Cuatro Puntos.	94
Figura 27 Curva de variación de la resistencia a la fatiga en la prueba de Flexión de Viga en Cuatro Puntos.	95
Figura 28 Contraste del valor T de la Estabilidad.	103
Figura 29. Contraste del valor T de la resistencia al ahuellamiento permanente.	107

Resumen

Esta investigación es de enfoque cuantitativo que surge ante el problema de un exigua y escasa propuesta tecnológica para mejorar las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas ;resistencia a la deformación y flexión elástica, disminución de la deformación permanente , resistencia a la fatiga, resistencia al envejecimiento que incrementen la vida útil de las carpetas asfálticas, que se resuelve con el objetivo: determinar la influencia de la adición de polímeros elastómero termoplástico sintético en la mezcla asfáltica altamente modificada para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas, mediante los ensayos de laboratorio., aplicando la metodología deductivo con orientación aplicada y enfoque cuantitativo; el tipo de investigación es descriptiva, correlacional y explicativa, así mismo el nivel es descriptivo, relacional y explicativo; mientras que el diseño es experimental, prospectivo, longitudinal, obteniendo como resultado de la modificación con polímeros elastómero termoplástico sintético en proporciones a 7.5%, 8.0% y 8.5% en relación al peso del asfalto. Tiene mayor estabilidad, menor deformación y flexión elástica, menor deformación permanente, mayor resistencia fatiga cumpliendo con los requerimientos mínimos para una mezcla asfáltica altamente modificada. Que nos llevó a la conclusión de que los polímeros elastómero termoplásticos sintéticos mejoran los valores de las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas altamente modificadas.

Palabras clave: Estabilidad, Flujo, Ahuellamiento, Rigidez, Deformación.

Abstract

This research is a quantitative approach that arises from the problem of a meager and scarce technological proposal to improve the physical and mechanical properties of asphalt mixtures; resistance to deformation and elastic bending, decrease in permanent deformation, resistance to fatigue, resistance to aging that increase the useful life of the asphalt binders, which is resolved with the objective: to determine to what extent the synthetic thermoplastic elastomer polymers increase the physical and mechanical properties of the highly modified asphalt mixture, through laboratory tests, applying the deductive methodology with applied orientation and quantitative approach; the type of research is descriptive, correlational and explanatory, likewise the level is descriptive, relational and explanatory; while the design is experimental, prospective, longitudinal, obtaining as a result of the modification with synthetic thermoplastic elastomer polymers in proportions of 7.5%, 8.0% and 8.5% in relation to the weight of the asphalt. It has greater stability, less elastic deformation and bending, less permanent deformation, greater fatigue resistance, meeting the minimum requirements for a highly modified asphalt mix. Which led us to the conclusion that synthetic thermoplastic elastomeric polymers increase the values of the physical and mechanical properties of highly modified asphalt mixtures.

Keywords: Stability, Flow, Rutting, Stiffness, Deformation.

Introducción

La investigación del diseño de una mezcla asfáltica altamente modificada con polímeros elastómero termoplástico sintético para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas, está dirigido a determinar nuevas tecnologías que mejoren el desempeño de las mezclas asfálticas. La investigación se justifica ante los problemas más frecuentes que afectan al pavimento específicamente a la carpeta asfáltica esta presenta un envejecimiento prematuro debido al cambio en sus propiedades mecánicas que tienen un efecto negativo en el comportamiento y la serviciabilidad durante su vida útil; así mismo las deformaciones de carácter permanente producida por la falta de consistencia del asfalto en las mezclas asfálticas que están sometidas a un gradiente de temperaturas producen el ahuellamiento y fisuramiento por fatiga que afectan el pavimento ante la aplicación de cargas de trabajo frecuente sobre la carpeta asfáltica del pavimento.

La formulación de la investigación se realiza bajo los parámetros del ensayo Marshall para el diseño de las mezclas asfáltica, a partir del cual, se efectúa la modificación de la mezcla asfáltica con polímeros elastómero termoplástico sintético en porcentajes mayores al 7.5%, las cuales son evaluadas con otros ensayos de modulo resiliente, ensayo de rueda cargada y ensayo a flexión de viga en cuatro puntos. La metodología de la investigación empleada será un método deductivo con orientación aplicada y enfoque cuantitativo; el tipo de investigación es descriptiva, correlacional y explicativa, así mismo el nivel es descriptivo, relacional y explicativo; mientras que el diseño es experimental, prospectivo, longitudinal, en la que se obtendrá datos que serán plasmadas en formatos establecidos para cada prueba de ensayos realizados, lo mismos que serán analizados para determinar los cambios generados. La investigación tiene la limitación por la carencia y escasez de empresas y/o instituciones que se dedican a dar servicio para la realización de ensayos

especializados como el Módulo Resiliente, Rueda Cargada, Flexión de Viga en Cuatro Puntos, y otros que imposibilitan un adecuado análisis del comportamiento de las mezclas asfálticas.

La investigación estará organizada en cinco capítulos principales, en la cual se ha desarrollado el Capítulo 1: planteamiento del problema, donde se describe y se formula el problema de la investigación; así mismo se detalla la importancia, justificación, delimitación y objetivos de la investigación. En el Capítulo 2: Marco teórico, se describe el marco histórico, investigaciones relacionadas con el tema, estructura teórica y científica, definición de términos básicos y las hipótesis de la investigación. En el Capítulo 3 Sistema de hipótesis .Capítulo 4: corresponde al Metodología, en la cual se describe el tipo, método y diseño de la investigación, así mismo se detalla y se describe la población y muestra; las técnicas e instrumentos que se utilizan para la recopilación de los datos y así mismo de describe el procedimiento de análisis y finalmente en el Capítulo 5: Resultados: se muestran los resultados de las pruebas y/o ensayos que sustentan la investigación y así mismo se ha desarrollado el análisis y discusión de los resultados obtenidos.

Capítulo 1 Planteamiento del Problema

1.1 Descripción de la Realidad Problemática

La infraestructura vial en el Perú está clasificada según su función jurisdiccional en tres grupos estos son: red vial nacional, red vial departamental y red vecinal, en total se tiene más de 175,589.0 km de las cuales 29,597.0 km esta pavimenta esto representa una cantidad mínima del 16.85% ; estas vías pavimentadas fueron ejecutadas con mezclas asfálticas con procedimientos caliente, tibia o en frio y no cumplieron con la finalidad para el cual fueron diseñados ; por esta razón las mezclas asfálticas convencionales son modificadas para incrementar y/o mejorar su propiedades físicas mecánicas y puedan utilizarse en vías con alto volumen de tráfico vehicular pesado, se busca materiales sintéticos como los polímeros con propiedades que mejoren la reología de los asfaltos.

Los estudios e investigaciones que se realizaron a nivel nacional e internacional lograron obtener resultados satisfactorios en el incremento o mejora de las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas y en algunos casos no se obtuvo resultados satisfactorios. Sin embargo, a pesar de haber obtenido resultados favorables en el comportamiento de las mezclas asfálticas estas no se utilizan de forma masiva, debido a su costo elevado durante la producción y colocación.

Según el análisis económico la pavimentación con una mezcla asfáltica altamente modificada tendrá una inversión inicial más alta respecto a una mezclas asfáltica convencional, sin embargo analizados a mediano y largo plazo los costos de mantenimiento son menores, debido a la duración o extensión de la vida útil de la carpeta asfáltica del pavimento, esto determina que el costo final del proyecto sea menor, así como las repercusiones sobre el medio ambiente son menores debido a un menor requerimiento y extracción de materia prima.

1.2 Formulación del Problema

1.2.1 Problema general.

¿De qué manera la adición de polímero elastómero termoplástico sintético mejoran las propiedades físicas y mecánicas de una mezcla asfáltica altamente modificada , determinados mediante ensayos de laboratorio?

1.2.2 Problemas específicos.

- ¿De qué manera la adición de polímeros elastómero termoplástico sintética mejora la propiedad de resistencia a la deformación de una mezcla asfáltica altamente modificada, mediante los parámetros de Estabilidad y Flujo del ensayo Marshall?
- ¿De qué manera la adición de polímeros elastómero termoplástico sintética mejora la propiedad de resistencia a la flexión elástica de una mezcla asfáltica altamente modificada, mediante el ensayo de Modulo Resilente?
- ¿De qué manera la adición de polímeros elastómero termoplástico sintético (SBS) mejora la propiedad de resistencia al ahuellamiento permanente de una mezcla asfáltica altamente modificada, mediante el ensayo de la Rueda Cargada?
- ¿De qué manera la adición de polímeros elastómero termoplástico sintética mejora la propiedad la propiedad de resistencia a la fatiga de una mezcla asfáltica altamente modificada, mediante el ensayo de la Flexión de Viga en Cuatro Puntos?

1.3 Objetivos de la Investigación

1.3.1 Objetivo general

Determinar el porcentaje en que se incrementan las propiedades físicas y mecánicas de una mezcla asfáltica altamente modificada al adicionar polímeros elastómeros termoplásticos sintéticos, mediante ensayos de laboratorio.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar el porcentaje en que se incrementa la propiedad de resistencia a la deformación de una mezcla asfáltica altamente modificada al adicionar polímeros elastómeros termoplásticos sintéticos, mediante los parámetros de Estabilidad y Flujo del ensayo Marshall.
- Determinar el porcentaje en que se incrementa la propiedad de resistencia a la flexión elástica de una mezcla asfáltica altamente modificada al adicionar polímeros elastómeros termoplásticos sintéticos, mediante el ensayo de Módulo Resilente.
- Determinar el porcentaje en que se incrementa la propiedad de resistencia al ahuellamiento permanente de una mezcla asfáltica altamente modificada al adicionar polímeros elastómeros termoplásticos sintéticos, mediante el ensayo de la Rueda Cargada de Hamburgo.
- Determinar el porcentaje en que se incrementa la propiedad de resistencia a la fatiga de una mezcla asfáltica altamente modificada al adicionar polímeros elastómeros termoplásticos sintéticos, mediante el ensayo de Flexión de Viga en Cuatro Puntos.

1.4 Delimitación de la Investigación

1.4.1 Geográfica

La presente investigación se llevará a cabo en la ciudad de Lima, Lima, Perú; en el laboratorio de la empresa CAH S.A encargada del diseño, producción y colocación de la mezcla asfáltica altamente modificada en el tramo: Óvalo de Habich – Puente Sta. María, entre los kilómetros 10+430 a 11+750 de la vía nacional panamericana norte.

1.4.2 Temporal

El proyecto de investigación se desarrollará durante los meses de agosto 2021 al mes de marzo del 2022.

1.4.3 Temática

Se plantea como temática principal la investigación de la mezcla asfáltica altamente modificada con polímeros elastómero termoplástico sintético. Para mejorar las propiedades físicas y mecánicas, así como conocer la resistencia a la deformación, flexión elástica, al ahuellamiento y a la fatiga.

Campo: infraestructura de carreteras

Área académica: Pavimentos

Línea de investigación: Obras viales.

Sub línea de investigación: Construcción

1.4.4 Muestral

La realización de la presente investigación tomara como muestras y unidad de análisis de la investigación cada diseño de la mezcla asfáltica altamente modificada con polímeros elastómero termoplástico sintético. Los cuales estarán

determinados por los porcentajes antes mencionados que mejoran la resistencia a la deformación, flexión elástica, al ahuellamiento y a la fatiga.

1.5 Justificación del Estudio

1.5.1 Conveniencia

La investigación es conveniente por la probable obtención de mejores resultados de la resistencia a la deformación, flexión elástica, al ahuellamiento y a la fatiga de la mezcla asfáltica altamente modificada con polímeros en porcentajes superiores al 7.5% en peso de asfalto, cuya aplicación puede conllevar a que las vías urbanas y/o carreteras con alto tráfico incrementen su vida útil.

1.5.2 Relevancia social

La investigación se justifica debida a que las vías con carpetas asfálticas altamente modificadas evitaran la temprana disgregación (generación de baches) y ahuellamiento, la cual reducirá los costos de operación y mantenimiento de los vehículos, favoreciendo a los usuarios de la vía.

1.5.3 Aplicaciones prácticas

La investigación se justifica debida a que ayudará a mejorar la vida útil de las carpetas asfálticas en caliente modificados con polímeros en porcentajes superiores al 7.5% en peso del asfalto, cuya demostración y explicación de los resultados logrados generará la posibilidad de su aplicación en los diversos proyectos a futuro.

1.5.4 Utilidad metodológica

Se realizó la investigación y selección de artículos, tesis nacionales e internacionales de los últimos 5 años relacionados con el tema a tratar se

desarrolló cuadros estadísticos para luego realizar el procesamiento y obtención de resultados de la investigación teniendo en cuenta la normativa para obras viales.

1.5.5 Valor teórico

La investigación se justifica porque tiene como propósito analizar el comportamiento de la mezcla asfáltica altamente modificada, teoría que no ha sido estudiado aun en Perú y de acuerdo a los resultados pueden ser empleados como una técnica para mejorar la vida útil de las carpetas asfálticas.

1.6 Importancia del Estudio

1.6.1 Nuevos conocimientos

Es importante por las razones siguientes:

La investigación prevé adquirir nuevos conocimientos sobre la composición de mezclas asfálticas altamente modificadas con polímeros elastómero termoplástico sintético. Para mejorar la resistencia a la deformación, tracción, desgaste y al ahuellamiento, con la finalidad de mejorar la vida útil del mismo.

La investigación será relevante en el futuro por ser demostrativo y aplicable en las carpetas asfálticas incorporando a las mezclas asfálticas altamente modificadas a obras viales con alto nivel de tráfico.

1.6.2 Aporte

El aporte del presente trabajo de investigación es teórico y tecnológico mediante el estudio la mezcla asfáltica altamente modificada compuesta por asfalto, polímero elastómero termoplástico sintético, material granular y aditivos, al lograr que tenga una mayor vida útil, se extendera los plazos de conservación

periódica y rutinaria, se reduce la extracción de material granular y emisión de gases durante la producción con lo cual se tiene un rédito en el impacto ambiental y social.

1.7 Limitaciones del Estudio

1.7.1 Falta de estudios previos de investigación

La carencia de investigaciones relacionadas a las mezclas asfálticas en el Perú y la falta de planificación del estado en la construcción de pavimentos flexibles de las vías influyen también en la falta de acceso a los laboratorios de especializados donde se realicen las pruebas y determinen las diferentes propiedades físicas y mecánicas, esto dificulta el desarrollo de la investigación y encare los costos de las pruebas en laboratorio.

1.7.2 Metodológicos o prácticos

Los escasos de material bibliográfico y metodológico en investigaciones de pavimentos flexibles en Perú implican recurrir a experiencias internacionales esto dificultará el acceso oportuno e influirá en la extensión del tiempo en la elaboración del estudio.

1.7.3 Medidas para la recolección de datos

Para la recolección de datos de esta investigación está basada en pruebas de laboratorio utilizando técnicas para medir la información de forma organizada y los instrumentos sirvieron como herramienta para recolectar la información necesaria y desarrollar nuestra investigación. Las muestras de agregados fueron recolectadas de las canteras Intrein y el asfalto obtenido de empresa Repsol.

1.7.4 Obstáculos en la investigación

Nuestra labor de investigación nos limita a saber en qué medida los polímeros elastómero termoplástico sintético mejoran las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla asfáltica altamente modificada.

1.8 Alcance

La presente investigación tiene como alcance conocer cuáles son las mejoras físicas y mecánicas de una mezcla asfáltica altamente modificada con polímeros elastómero termoplástico sintético. A nivel de laboratorio.

1.9 Viabilidad del Estudio

El responsable de este estudio cuenta con el tiempo suficiente para realizar cada uno de los aspectos relacionados con el desarrollo de este proyecto, acceso a la información, laboratorios así como el financiamiento, cuyos costos son asumidos por el mismo, los componente principales fueron el equipo de laboratorio y la disponibilidad de los técnicos laboratoristas que aparte de desarrollar su labor diaria en la obra se dieron tiempo para elaborar las necesidades de esta investigación para la obtención de resultados a fin de cumplir con los objetivos.

Capítulo 2 Marco Teórico

2.1 Marco Histórico

Históricamente los asfaltos modificados con polímeros se utilizaron en emulsiones asfálticas impermeabilizantes; riegos como tratamiento superficial en frío, estas modificaciones del asfalto, no son tan reciente, de acuerdo a King y et al, manifiesta que en 1843 se concedieron patentes para modificar asfaltos con polímeros naturales y sintéticos. En el continente Europeo a inicio de los años 30 se pusieron en marcha varios proyectos pilotos al respecto; en EE UU desde los años 50, fueron introduciendo los polímeros que encontrando un mercado pequeño pero constante; con el transcurso de los años, el uso se fue incrementando, especialmente con el inicio y desarrollo de las autopistas por el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (Strategic Highway Research Program SHRP); a partir del este, a principios de los años 90 se inician y se desarrollaron las especificaciones para ligantes asfálticos, conocido como el método Superpave Performance Graded-PG-SUPERPAVE.

2.2 Investigaciones Relacionadas con el Tema

2.2.1 *Antecedentes internacionales*

Cichocki, (2015). En su tesis de investigación explora el uso de mezclas asfálticas altamente modificadas (HiMA) como alternativa a los materiales estándar en el momento de construir los pavimentos perpetuos más delgados en Ohio. En la conclusión afirma que el asfalto modificado proporciona una mejora sustancial en la formación de surcos. Pero no mostró mejoras significativas en el soporte estructural al comparar el asfalto modificado a mezclas asfálticas estándar.

Bocanegra, (2019). En su investigación sobre la modificación de cementos asfálticos con hule molido de neumáticos (por el proceso terminal blend), se basa en tecnologías relativamente nuevas que propician una matriz de asfalto que mejora las propiedades de ingeniería de las mezclas, produciendo aglutinantes con características similares a los asfaltos modificados con polímeros en términos de reología y resistencia a los esfuerzos producidos en el pavimento. Concluye que, a partir de los resultados obtenidos en este trabajo, se ha podido demostrar que las mezclas elaboradas con asfaltos ahulados son capaces de alcanzar un comportamiento equivalente al de mezclas asfálticas que incorporan polímero (SBS), teniendo precaución con su diseño y fabricación.

Casanova, (2017). en su tesis estudia el efecto de la modificación de un asfalto de PEMEX, con los co-polímeros modificadores estireno butadieno estireno (SBS) y el Etil Vinil Acetato (EVA); sobre sus características: químicas, morfológicas, térmicas, mecánicas y reológicas con el fin de identificar diferentes niveles de modificación, así como la determinación del tipo y cantidad de polímero modificador. En cuyas conclusiones menciona que los resultados obtenidos mediante calorimetría diferencial de barrido permitieron identificar tres temperaturas de transición vítreas (T_g) en el asfalto crudo que están relacionadas con sus componentes fundamentales. Las mezclas con SBS y EVA alteraron dichas T_g evidenciando la modificación de las características térmicas del asfalto crudo. Las mezclas con SBS tuvieron un efecto más acentuado sobre las propiedades mecánicas, logrando una considerable disminución en la penetración y un aumento en el módulo elástico con respecto al asfalto sin modificar. Con respecto a las propiedades reológicas, se muestra un mejor comportamiento en los asfaltos modificados.

Suarez, (2018). En su investigación se enfoca en la dispersión de nanotubos de carbono para el asfalto Ac-20 y la incorporación con los agregados de la cantera de Catamayito III para formar las mezclas modificadas y comparar con las mezclas asfálticas convencionales a través del método Marshall y de esta forma obtener un mejor rendimiento y desempeño de la misma en el campo de la vialidad. En este escenario, la investigación estudia la modificación del asfalto convencional y el asfalto modificado con NTC en las mezclas asfálticas, evaluando sus características por el método Marshall. donde concluye que la mezcla asfáltica modificada con NTC presentó mejoras en el desempeño de una de sus propiedades al incrementar la estabilidad hasta 72.96% respecto al hormigón asfáltico no modificado y una disminución del flujo al reducir el 29.41% en un porcentaje de concentración de NTC del 1% en la mezcla asfáltica. La razón fundamental de la disminución del flujo se le atribuye al módulo de Young de los NTCs (Faramarzi. M, Arabani. M, Haghi. K y Mottaghitalab, 2015).

Galindo, (2020). En su investigación contempla la revisión de los tipos de cementos asfálticos (AC20 Salamanca, Elvaloy 4170 y Elvax 240) utilizados en conjunto con agregados pétreos con granulometría densa y cuya finalidad es evaluar su comportamiento ensayadas a la Tensión Indirecta y el ensaye Cántabro. Ambos parámetros utilizados para determinar su respuesta ante el esfuerzo, aunado a una deformación y la cohesión de las mezclas con diversos contenidos de cementos asfálticos. Donde se determinó que en cuanto mayor era el contenido de cemento asfáltico el porcentaje de desgaste cántabro disminuía al igual que la resistencia a la tensión. Las mezclas asfálticas modificadas con termopolímero tuvieron mejor desempeño con respecto a las modificadas con una resina.

2.2.2 Antecedentes nacionales

Estrada, (2017), llevo a cabo una investigación denominada “Estudio y Análisis de Desempeño de Mezcla Asfáltica Convencional PEN 85/100 Plus y Mezcla Asfáltica Modificada con Polímeros Tipo SBS 70-28” en la Universidad Andina del Cusco, Cusco – Perú. Este trabajo de investigación nos menciona que en la región del Cusco se acostumbra utilizar las mezclas asfálticas convencionales con asfalto PEN 85/100, por tal motivo se tomó como mezcla patrón para este trabajo la mezcla asfáltica convencional PEN 85/100 Plus, esta es una mezcla convencional que lleva la denominación Plus debido a la incorporación de un aditivo mejorador de adherencia, la propuesta es mejorar el comportamiento de la mezcla y para esto se presenta un asfalto que con la modificación de un polímero en este caso SBS PG 70 -28, se sabe que estos son muy recomendados en climas fríos, que aplica perfectamente en esta investigación. Además, se ejecutaron ensayos de desempeño buscando determinar el comportamiento de las mezclas asfálticas respecto a temas de deformación y fatiga ya que son los problemas más frecuentes que se presentan en las mezclas asfálticas.

Adauto (2019), publica su tesis de posgrado para optar el grado académico de maestro en ingeniería vial con mención en carreteras, puentes y túneles, “tiene como finalidad el uso de un nuevo material como es la adición de la ceniza de la caña de maíz en la mezcla asfáltica en caliente, con el propósito de aumentar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente, como el flujo y estabilidad, la resistencia al daño por humedad, resistencia a la deformación permanente, la trabajabilidad y la caracterización de la curva granulométrica, tiene como objetivo de la investigación determinar el comportamiento mecánico de una

mezcla asfáltica en caliente con la adición de ceniza de caña de maíz para aumentar la resistencia estructural del pavimento”.

Concluye, “que la ceniza de caña de maíz mejora el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica en caliente, por lo que se puede afirmar que posee propiedades puzolánicas. Se obtuvo un porcentaje óptimo en adición de ceniza de 0.5% para un contenido óptimo de ligante asfáltico de 6.0%. La adición de ceniza de caña de maíz hasta un 1.0% en la mezcla asfáltica en caliente mejora el comportamiento flujo – estabilidad en relación a la mezcla patrón. Los resultados de las mezclas asfálticas con adición hasta un 1.0% de ceniza muestran resultados más estables dentro del parámetro exigido por las especificaciones AASHTO (1,700 – 4,000 kg/cm), el cual aporta un comportamiento adecuado de la mezcla asfáltica; mientras que, los resultados de la mezcla patrón se encuentran cerca al límite superior del parámetro” (Adauto, 2019).

En su análisis de la investigadora utilizaron el diseño de mezcla con la metodología Marshall añadiendo la ceniza de caña de maíz, donde en el resultado existe un ligero mejoramiento de sus propiedades mecánicas frente a un diseño Marshall convencional. Con ello se evidencia que la caña de maíz tiene propiedades puzolánicas que aumentan sus propiedades mecánicas de la mezcla, esta investigación nos ayuda a ver que el diseño de mezcla SMA con fibra de bagazo de caña de azúcar pueda mejorar su desempeño mecánico.

De La Cruz (2019), publica su tesis de posgrado para optar el grado académico de maestro en ingeniería vial con mención en carreteras, puentes y túneles, “tiene como finalidad promover e impulsar la producción de este tipo de mezclas asfálticas en el Perú, considerando como fibra alternativa a la celulosa, la fibra de basalto, que funciona

adecuadamente como estabilizador de las mezclas asfálticas SMA, además, que se encuentran como recurso natural propio del Perú, tiene como objetivo de la investigación incorporar fibras de basalto, como sustituto de las fibras de celulosa, a las mezclas asfálticas SMA a fin de estabilizarlas según la especificación de diseño AASHTO”.

Concluye, “que la incorporación de fibras de basalto, como sustituto de las fibras de celulosa en el diseño de las mezclas asfálticas Stone Mastic Asphalt (SMA), incrementó levemente los parámetros volumétricos tales como los Vacíos en el agregado mineral (VMA), Vacíos en el agregado en la mezcla compactada (VCAmix); es así que para el diseño óptimo de la mezcla asfáltica SMA con fibras de basalto se tiene un VMA de 18.20% y un VCAmix de 33.30% frente a un VMA de 17.15% y VCAmix de 32.50% con fibras de celulosa respectivamente, que representan un incremento del 6.12% y 2.46% respectivamente con referencia a la muestra patrón con fibras de celulosa; así mismo la utilización de fibras de basalto en el diseño óptimo de las mezclas asfálticas SMA requiere de un mayor porcentaje de ligante asfáltico de 6.52% referente al peso de la mezcla, frente a un 6.45% con la utilización de fibras de celulosa, que representa un incremento del 1.09% con referencia a la muestra patrón. Por otra parte, respecto a los Vacíos en el agregado grueso en la condición dry rodded (VCAdrc), tanto para las mezclas asfálticas con fibras de basalto y celulosa se obtuvo un valor de 37.50%” (De La Cruz, 2019).

En la investigación, se desarrolla una mezcla SMA con fibra de basalto sustituyendo a la fibra celulosa que es convencional, resulta que en su comportamiento físico – mecánico son iguales entre los dos, comprueba que la fibra de basalto puede reemplazar satisfactoriamente a la fibra celulosa en un diseño de mezcla SMA. Con ello se ve que hay fibras que requieren ser utilizadas para su elaboración en masa y además no son

contaminantes, eso nos ayuda a la investigación que la fibra de bagazo de caña de azúcar también puede sustituir satisfactoriamente a la fibra celulosa en dicha mezcla.

Peña (2019), publica su tesis de posgrado para optar el grado académico de maestro en ingeniería vial con mención en carreteras, puentes y túneles, “tiene como finalidad utilizar la ceniza volantes, material que es considerado un pasivo ambiental, lo cual debido a su actividad puzolana y la buena reacción química con el asfalto pueda cubrir la necesidad de prolongar la vida útil del pavimento y a la vez contribuir a la reducción de impactos ambientales negativos, tiene como objetivo de la investigación determinar el porcentaje de incorporación de cenizas volantes provenientes de la termoeléctrica de Ilo para incrementar el desempeño mecánico de la Mezcla Asfáltica en Caliente”.

Concluye, “que al incorporar cenizas volantes al llénate mineral por encima de 0.75% se obtuvo valores de Estabilidad – Flujo aproximados a 3853 kg/mm en comparación a los parámetros Marshall de la Mezcla Asfáltica en Caliente sin incorporación de cenizas, asimismo se observa un mejor comportamiento de la resistencia al daño por humedad de la Mezcla Asfáltica en Caliente con 0.75% de incorporación de cenizas resultando 86.6%. En virtud de ello se tomó dicho porcentaje para verificar la durabilidad de la Mezcla Asfáltica en Caliente mediante el ensayo de Rueda de Hamburgo con el 0.75% de cenizas volantes y 0.25% de cal hidratada, el ensayo arrojó valores en función a la profundidad de ahuellamiento alcanzando 12.5mm a las 19,600 pasadas con respecto a la Mezcla Asfáltica sin incorporación de cenizas volantes que alcanzo 9.24mm a las 20,000 pasadas. Se observa que la durabilidad (resistencia a la deformación permanente) decreció en un 73.92%, parámetro medio de acuerdo al ensayo de la Rueda de Hamburgo” (Peña, 2019).

La ceniza volante tiene propiedades puzolánicas, hace que la mezcla aumenta su resistencia. Con el diseño Marshall utilizando la ceniza volante tiene una tendencia al crecimiento por la misma propiedad de la ceniza, con ellos el autor demuestra que se puede utilizar como aditivo, que mejora su desempeño mecánico de la mezcla (resistencia y durabilidad) y puede ser útil en el norte del Perú según el autor.

2.3 Investigaciones Relacionadas con el Tema.

Pfeiff,Kroger (2019) en la investigación “Análisis comparativo del desempeño de cementos asfálticos altamente modificados” presentada al congreso latinoamericano de asfalto ,XX CILA donde se estudió comparativamente el desempeño de un cemento asfáltico altamente modificado, denominado HiMA (Highly Modified Asphalt), con respecto a un asfalto modificado estándar (AM3) y un convencional (AC-30), así como repasar brevemente su procedimiento de fabricación en laboratorio. El uso de este tipo de ligante aún no se ha considerado para el uso extensivo dentro de la región y se cree que podría traer grandes ventajas para los contratistas viales. Para realizar este análisis los investigadores utilizaron un reómetro de corte dinámico (DSR) con el fin de estudiar el comportamiento reológico de los tres ligantes por medio de los ensayos de PG (Performance Grading) y de MSCR (Multiple Stress Creep Recovery). La siguiente etapa incluyó el análisis del desempeño de cada ligante en la mezcla asfáltica, utilizando el mismo diseño de mezcla para cada tipo de cemento. Aquí se realizaron ensayos de Wheel-Tracking Test (ensayo de rueda cargada), fatiga en viga de cuatro puntos y tracción indirecta por compresión diametral (módulo dinámico). Para finalizar se puede concluir lo siguiente:

- a) Se ha constatado un avance en la tecnología de los asfaltos modificados al conocer un nuevo agente modificador que permite mayores tenores del mismo en los asfaltos por presentar una mejor compatibilidad.
- b) Varios estudios y pruebas con los asfaltos altamente modificados alrededor del mundo sugieren que el desarrollo de los asfaltos modificados está apuntando en esa dirección, con la posibilidad concreta de que esta tecnología puede tener una aplicación práctica en el futuro no muy lejano.
- c) La información obtenida en todos los ensayos apunta a que las mezclas asfálticas con este HiMA presentan mejores características y desempeño que las mezclas con los asfaltos modificados estándar y convencionales utilizados en este estudio.
- d) El sistema de gradeo por PG es una herramienta útil pero que presenta sus falencias; surge como alternativa el ensayo MSCR para lograr una caracterización más eficaz del desempeño de ligantes asfálticos en lo referente a la deformación permanente o ahuellamiento. El HiMA presentó la mejor categorización (E) para temperaturas desde los 64°C hasta los 76°C.
- e) El asfalto HiMA tiene un comportamiento 4 veces mejor que un AM3 respecto a las deformaciones permanentes y tiene una durabilidad de más del doble en el ensayo de fatiga para una mezcla CAC S12.
- f) El método de fabricación del HiMA no difiere demasiado de un modificado estándar, por lo que no habría que realizar grandes alteraciones a las actuales plantas de modificación de asfalto.

Bessa, Vasconcelos, Castelo Branco, Bernucci,(2019), en la investigación “Evaluación de aglutinantes asfálticos puros y modificados en relación con el agrietamiento por fatiga mediante caracterización reológica”

La predicción del deterioro de los pavimentos asfálticos en relación a las principales tensiones ha sido propuesta por diferentes investigadores mediante caracterización de laboratorio combinada con modelos de comportamiento. Las pruebas realizadas en diferentes materiales asfálticos - ligante asfáltico, mezcla asfáltica y mezcla de agregado fino (FAM) - se han utilizado para obtener la resistencia de estos materiales en relación con la formación de surcos y el agrietamiento por fatiga. Con respecto a la caracterización de la resistencia al agrietamiento por fatiga, no existe un consenso universal sobre el método de prueba, el criterio de falla y la geometría de la muestra. Las pruebas de laboratorio de los aglutinantes asfálticos son relevantes porque la fatiga depende en gran medida de las propiedades reológicas de estos materiales. Las pruebas para obtener los parámetros de viscoelástico lineal, pruebas de barrido de tiempo (TST) y pruebas de barrido de amplitud lineal (LAS) se realizaron en la presente investigación a una temperatura de 20 ° C, para tres tipos diferentes de ligantes asfálticos: uno puro ligante de asfalto clasificado como 30/45 para grado de penetración, un ligante de asfalto modificado con SBS y un ligante de asfalto altamente modificado (HiMA). Se compararon los resultados obtenidos de las diferentes pruebas. Las principales conclusiones fueron que existe una buena correlación lineal entre las vidas de fatiga obtenidas para la prueba LAS y las obtenidas de los resultados de la TST, pero los valores son cinco más altos para un ligante de asfalto altamente modificado (HiMA).

Blazejowski et al, (2016). en la investigación “El rendimiento de aglutinantes de alta resistencia altamente modificados en pavimentos de asfalto”

Los pavimentos asfálticos de larga duración como concepto surgieron a finales del siglo XX. Según los supuestos es posible lograr durabilidad incluso durante 50 años. La clave para lograr una vida tan larga es la elección adecuada de un aglutinante asfáltico, excepto las propiedades de las mezclas asfálticas. Hace unos años se creó una nueva familia de ligantes altamente modificados que se caracterizó por fase reversa de la mezcla de polímero y betún, y ahora es un ejemplo perfecto de un aglutinante que cumple con la longevidad del pavimento concepto de supuestos. Basado en un nuevo polímero especial que fue desarrollado por la industria de los polímeros, una nueva familia de aglutinantes:

Se han desarrollado asfaltos altamente modificados (HiMA): "duros" (EN 25 / 55-80, PG 94-22), "medios" (EN 45 / 80-80, PG 82-28) y "suave" (EN 65 / 105-80, PG 76-28). Todos los aglutinantes se probaron de acuerdo con un programa de prueba muy amplio. Resultados confirmados superiores rendimiento de los ligantes probados y su influencia muy positiva sobre el asfalto. El artículo presenta resultados de pruebas y análisis de ligantes modificados con polímeros, tipo HiMA. La investigación se ha realizado en base a los estándares europeos y de acuerdo con las Superpave (sistema de grados PG).Asfalto altamente modificado PMB HiMA es un ligante dedicado a aplicaciones que requieren ligantes con muy alto rendimiento: pavimentos asfálticos sometidos a grandes esfuerzos, por ejemplo: en tableros de puentes, capa superior con resistencia a bajas temperaturas, cursos de uso delgados y ultrafinos, capas base de asfalto con muy alta resistencia a la fatiga, p. Ej .: para tipos de pavimento de larga duración como pavimentos perpetuo. Los resultados de las pruebas demostraron que los aglutinantes HiMA se pueden aplicar en una amplia gama de

temperaturas de pavimento. Bajo las propiedades de temperatura, según la prueba BBR, mostraron que el aglutinante es resistente a las grietas inducidas por la temperatura. Vale la pena ver que ambos parámetros BBR (m y S) para PMB HiMA 'medio' y 'suave' no solo son bajos sino con valores cercanos, así como. Por otro lado, los resultados de la prueba de celo mostraron que todos los ligantes de HiMA presentan un resultado extremadamente bueno a la resistencia. Hemos visto un aumento de la carga de tráfico en términos de número de vehículos que pasan, pero también de un aumento parte de las cargas máximas por eje. Por otro lado, los inversores y los usuarios de la carretera están estableciendo requisitos más altos (períodos de garantía de hasta 10 años, por ejemplo). Por lo tanto, nos enfrentamos a un desafío cada vez mayor que requiere soluciones en calidad de mezcla, aglutinante o ambas. Nuevos aglutinantes modificados con niveles aumentados de polímero (HiMA) son capaz de cumplir con estos altos requisitos.

Maila, P. (2013). *Comportamiento de una mezcla asfáltica modificada con polímero etileno vinil acetato*, el objetivo principal planteado fue para evaluar los cambios en las propiedades físico - mecánicas de la mezcla convencional frente a la mezcla modificada con polímero etileno vinil acetato. La metodología de la investigación

abarca desde la caracterización de los materiales, el diseño y estudio de las propiedades física - mecánicas de las mezclas asfálticas mejoradas con polímero Etileno Vinil Acetato y la evaluación de las mejoras en la vida útil del pavimento. Para el mejoramiento de las mezclas asfálticas se ha estudiado la incorporación del polímero en el ligante asfáltico y determinar las propiedades físicas y mecánicas del ligante asfáltico mediante los ensayos de viscosidad, penetración, punto de reblandecimiento, ductilidad, pérdida por calentamiento y punto de inflamación. Las conclusiones arribadas de la

investigación de acuerdo a los ensayos realizados en pruebas de laboratorio se determinó que se tiene una notable mejora en las propiedades mecánicas tales como módulo dinámico elástico, resistencia a la tensión indirecta, resistencia a la pérdida por desgaste, estabilidad, flujo y susceptibilidad térmica de la mezcla modificada con respecto a la mezcla convencional, por lo que se puede asegurar que los daños viales van a disminuir con la utilización de esta mezcla y la mezcla modificada óptima de la investigación quedó constituida por 60% de agregado grueso, 40% de agregado fino, 6,3% de asfalto y 3% de polímero etileno vinil acetato (en peso de asfalto).

Granados, J. (2017). *Comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica en caliente modificada con caucho mediante proceso por vía seca, respecto a la mezcla asfáltica convencional*, el objetivo fue determinar la influencia de la incorporación de granos de caucho en el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica modificada mediante el proceso por vía seca. En cuya investigación ha logrado efectuar ensayos de Compresión - Inmersión a la mezcla modificada para determinar la temperatura y tiempo de digestión, así como ensayos Marshall sobre la mezcla asfáltica convencionales y modificados con caucho a fin de evaluar su comportamiento mecánico. Con los diseños óptimos de ambas mezclas, han procedido a evaluar su comportamiento mediante los ensayos de caracterización y desempeño: Resistencia a compresión diametral, Resistencia de la mezcla asfáltica compactada al daño inducido a la humedad, Ensayo de cántabro de pérdida por desgaste, ahuellamiento por medio de la Rueda de Hamburgo y Módulo resiliente.

Los resultados obtenidos muestran mejoras en el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica modificada, lo cual permitió concluir que la incorporación del caucho en una mezcla asfáltica presenta: menor pérdida de resistencia por efecto del agua, mayor

resistencia a la deformación, mayor cohesión y resistencia al esfuerzo cortante, mayor resistencia al ahuellamiento y menor daño por humedad, mejora el comportamiento elástico, así como presenta similar comportamiento en la resistencia a la disgregación de la mezcla; los cuales se traduce en una mayor durabilidad ante los agentes agresores e incrementa la vida útil del pavimento.

2.4 Estructura teórica y Científica que Sustenta el Estudio

El diseño de mezcla asfáltica implica la selección y dosificación de los materiales para obtener las propiedades deseadas en el producto terminado. El concreto asfáltico está diseñado para resistir la formación de ahuellamientos, la fatiga, agrietamiento en bajas temperaturas y otras formas de falla. Las fallas más serias asociadas a los pavimentos de asfalto son las grietas, que se producen a temperaturas intermedias y bajas; y la deformación permanente, que se produce en altas temperaturas. Estas fallas reducen la vida útil de la vía y elevan los costos de mantenimiento. El cemento asfáltico une las partículas de agregado, mejora la estabilidad de la mezcla y proporciona resistencia a la deformación bajo compresión y tensiones de cizallamiento inducidas. (Nuha, Asim, Mohamed y Mahrez, 2013, p.45)

El desempeño de la mezcla de asfáltica está en función al cemento asfáltico, agregados, y sus propiedades volumétricas. En los últimos años, ha habido un rápido aumento en el uso de aditivos en mezclas de hormigón asfáltico para mejorar sus propiedades. Los pavimentos asfálticos se definen como capas de asfalto construidas unidas sobre una base granular. Debido a esto, la estructura total del pavimento se deflecta por las cargas de tráfico, por lo que estos tipos de pavimentos se conocen como pavimentos

flexibles. Una estructura de pavimento flexible se compone de varias capas de materiales. Básicamente, la estructura del pavimento se divide en tres capas, revestimiento bituminoso (carpeta asfáltica), la base (superficie de la carretera), y subbase. (Granados, 2017, p.15)

El concreto asfáltico debe tener una alta rigidez para ser capaz de resistir la deformación permanente. Por otro lado, las mezclas deben tener suficiente tensión en la parte inferior de la capa de asfalto para resistir agrietamiento por fatiga después de muchas aplicaciones de carga. El objetivo general para el diseño de mezclas de asfalto de pavimentación es determinar una mezcla económica y la gradación, así como el porcentaje de asfalto que producirá una mezcla que tiene ligante suficiente para asegurar un pavimento duradero, suficiente estabilidad, suficientes vacíos en la mezcla total compactada que permitan una ligera cantidad de compactación adicional bajo la carga de tráfico sin levantarse, y suficiente trabajabilidad para permitir la eficiente colocación de la mezcla sin segregación. (Granados, 2017, p.16)

El incremento en la demanda de las carreteras pavimentadas con mezclas asfálticas convencionales podrían reducir sus propiedades mecánicas y que estas vías asfaltadas puedan ser más susceptibles a las fallas; uno de los componentes principales de la mezcla asfáltica es el cemento asfáltico, el cual tiene un rango limitado de sus propiedades reológicas y de durabilidad, los cuales son insuficientes para contribuir en resistir a las diversas fallas que se presentan en el pavimento; razón por la cual diversos investigadores e ingenieros vienen buscando modificadores de los cementos asfálticos.

Actualmente existen diversos procesos y aditivos que se vienen empleando para la modificación del asfalto como es el caso de estireno butadieno estireno (SBS), estireno-butadieno (SBR), etileno acetato de vinilo (EVA) y polvo de neumático (CRM); el empleo

de los polímeros comerciales como el SBS y SBR en la pavimentación de carreteras incrementan en su costo inicial de construcción, debido a que estos polímeros tienen un costo elevado; sin embargo existen la posibilidad del empleo de otros tipos materiales como el polvo de neumático reciclado (CRM) y algunas fibras como el polipropileno pueden traer beneficios al ambiente y así mismo reducir costos.

Características y comportamiento de la mezcla:

Según el Instituto del Asfalto (1982) las mezclas asfálticas pueden ser preparadas en laboratorio, para luego ser analizados con la finalidad de determinar el comportamiento y/o desempeño de la estructura del pavimento; este análisis debe ser realizado en cuatro características de la mezcla asfáltica, las cuales pueden influenciar en el comportamiento del mismo; siendo estas características la densidad, vacíos de aire, vacíos del agregado mineral y el contenido del cemento asfáltico.

Propiedades consideradas en el diseño de mezclas:

Así mismo, el Instituto del Asfalto (1982) determina que las mezclas asfálticas en caliente de buena calidad se comportan bien, cuando estas han sido diseñadas, producidas y colocadas adecuadamente para lograr las propiedades deseadas de un pavimento; existen varias propiedades que mejoran la buena calidad de un pavimento con mezclas asfálticas en caliente, siendo estas la estabilidad, durabilidad, impermeabilidad, trabajabilidad, flexibilidad, resistencia a la fatiga y la resistencia al deslizamiento.

El objetivo principal del procedimiento para el diseño de mezclas asfálticas es el de garantizar que la pavimentación posea cada una de las propiedades descritas en el párrafo

anterior; por lo cual, se debe conocer el significado de cada una de esas propiedades, cómo es evaluada, y que representa en términos del comportamiento del pavimento.

Pavimento flexible de concreto asfáltico en caliente:

El pavimento asfáltico se define como: “Constituido con materiales bituminosos como aglomerantes, agregados y de ser el caso aditivos” (Glosario de términos MTC, 2018, p.21) Así mismo, el concreto asfáltico se define como: “Mezcla procesada, compuesta por agregados gruesos y finos, material bituminoso y de ser el caso se incorpora aditivos para mejorar sus propiedades de comportamiento. Es utilizada como capa de base o de rodadura y forma parte de la estructura del pavimento” (Glosario de términos MTC, 2018, p.8)

Mezcla asfáltica modificada

Según el Instituto del Asfalto (1982), un asfalto modificado es un asfalto al que se le adicionó un agente que cambia sus características iniciales, las cuales pueden ser la Viscosidad, Durabilidad, Elasticidad, etc., con lo que se logra mejorar a la mezcla asfáltica con características necesarias para resistir los esfuerzos, los agentes climáticos, y las condiciones de trabajo que propician su desgaste, el cual puede ser prematuro. Los agentes modificadores utilizados en los asfaltos, mejoran el comportamiento reológico de los mismos. Se puede decir que un asfalto modificado es un ligante hidrocarbonado resultante de la interacción física y/o química de los polímeros con un ligante asfáltico. Un asfalto puede modificarse con rellenos minerales, cauchos, polímeros, plásticos o hidrocarburos. Los asfaltos se caracterizan por variar su comportamiento según la temperatura a la que se encuentren; es por ello que a distintas temperaturas el asfalto posee distintas consistencias, propiedad que se denomina susceptibilidad térmica, la cual debería ser lo más baja posible, de modo que a bajas temperaturas y tiempos cortos de aplicación de cargas,

sean lo suficientemente flexibles para evitar el fisuramiento y a tiempos prolongados de aplicación de cargas, sean resistentes a las deformaciones. Los asfaltos modificados con polímeros tienen mejor comportamiento que los asfaltos convencionales, tanto en altas como en bajas temperaturas, proporcionando mayor vida útil al pavimento.

La modificación de asfalto es una nueva técnica utilizada para el aprovechamiento efectivo de asfaltos en la pavimentación de vías. Esta técnica consiste en la adición de polímeros a los asfaltos convencionales con el fin de mejorar sus características mecánicas, es decir, su resistencia a las deformaciones por factores climatológicos y del tránsito. Los agentes modificadores utilizados en los asfaltos, mejoran el comportamiento reológico de los mismos. Se puede decir que un asfalto modificado es un ligante hidrocarbonado resultante de la interacción física y/o química de los polímeros con un ligante asfáltico. Un asfalto puede modificarse con rellenos minerales, cauchos, plásticos o hidrocarburos. Los asfaltos se caracterizan por variar su comportamiento según la temperatura a la que se encuentren; es por ello que a distintas temperaturas el asfalto posee distintas consistencias, propiedad que se denomina susceptibilidad térmica, la cual debería ser lo más baja posible, de modo que a bajas temperaturas y tiempos cortos de aplicación de cargas, sean lo suficientemente flexibles para evitar el fisuramiento y a tiempos prolongados de aplicación de cargas, sean resistentes a las deformaciones. La situación ideal es aquella de aquel asfalto que mantiene su consistencia en un amplio intervalo de temperatura. Los polímeros son sustancias orgánicas de alto peso molecular que logran hidratarse e hincharse dentro del asfalto. Así por ejemplo tenemos los cauchos, de comportamiento elastomérico. Algunos polímeros generan cadenas lineales, otros en bloque, pero en general la macrodispersión lograda consta de un sistema de dos fases en donde

- El polímero se dispersa sin ejercer efecto alguno.

- Absorben los aceites máltenos y se hinchan.

Se dispersan en forma molecular. El grado de dispersión depende de la temperatura de trabajo, del esfuerzo de corte ejercido, de la aromaticidad de los máltenos del asfalto base y de la cantidad de asfáltenos presentes. En general un agente modificador logra:

- Disminuir la susceptibilidad térmica.
- Aumentar la cohesión interna.
- Mejorar la elasticidad y flexibilidad a bajas temperaturas.
- Mejorar el comportamiento a fatiga.
- Aumentar la resistencia al envejecimiento.

Los asfaltos modificados quedan así constituidos por dos fases diferenciables:

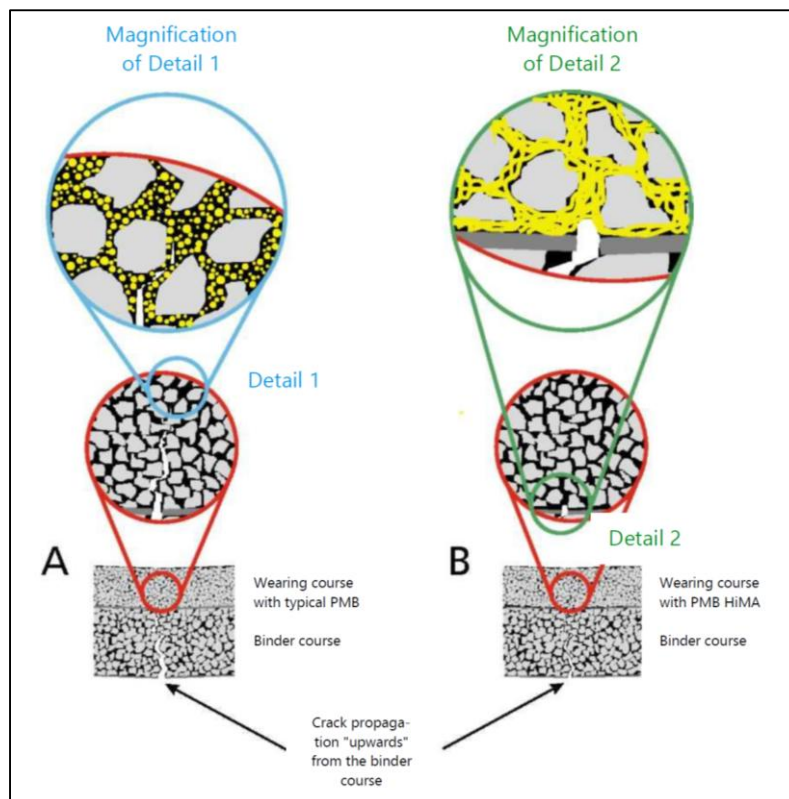
1) Polímero

2) Ligante Asfáltico.

Cuando hay bajas concentraciones de polímeros existe una matriz continua de ligante asfáltico en la que se encuentra disperso el polímero, a altas concentraciones de ligante asfáltico se invierten las fases. Esta estructura da origen al cambio de comportamiento de los asfaltos modificados.

Figura 1

- Propagación de grietas a través de capas de asfalto, a) con ligante modificado con polímero típico, b) con aglutinante altamente modificado



Fuente: ORLEN ASFALT, highly modified binders Orbiton HiMA, Inc. – 2015

Mezcla Asfáltica Altamente Modificado por Polímeros SBS

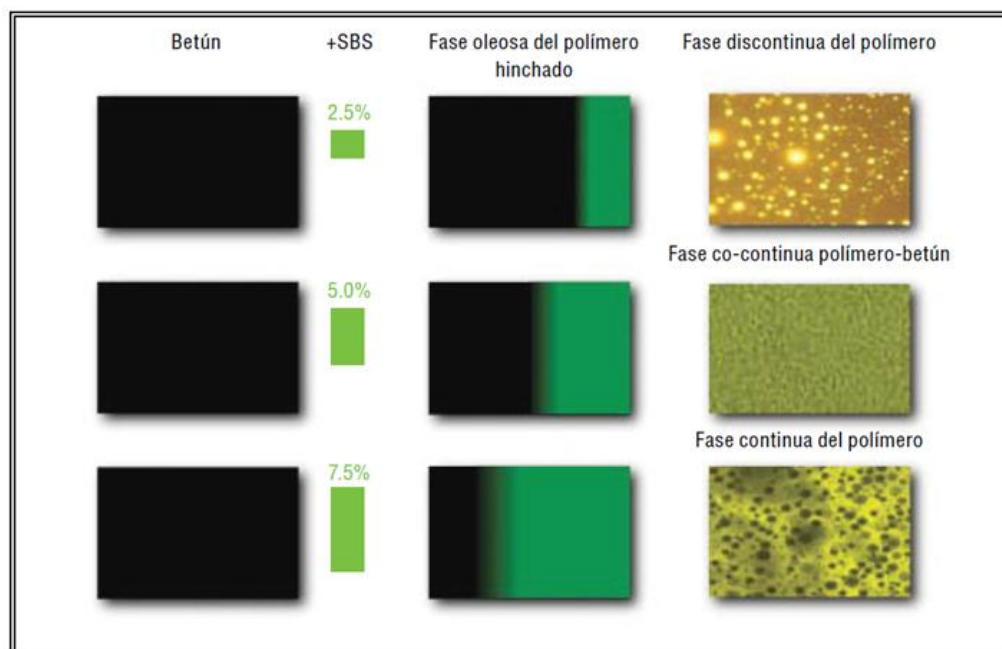
HiMA (Highly Modified Asphalt) es un ligante de asfalto altamente modificado con polímeros, obtenido al agregar polímeros especiales al asfalto. Esta composición da como resultado un mejor desempeño del pavimento en relación a la deflexión de su condición estructural, grietas, huellas de ruedas, entre otros. Otra ventaja de HiMA es que se encuentra en un rango de temperatura de -30°C a 70°C . Así, HiMA mantiene sus propiedades elastoméricas, lo que reduce la deformación permanente del asfalto a altas temperaturas y elimina su comportamiento frágil a bajas temperaturas.

Esta nueva tecnología puede aumentar la tasa de polímero SBS a más del doble que la utilizada en los asfaltos modificados comunes, además de ser una mezcla viable que es fácil de aplicar en el campo. HiMA tiene garantizada una resistencia a la fatiga y deformación permanente mayor que en los Cementos asfálticos modificados por polímeros elastoméricos convencionales tipo 55/75, 60/85 y 65/90, dada su alta concentración de polímeros. Por lo tanto, HiMA puede verse más como un "polímero modificado con asfalto" que como un asfalto modificado con polímero (REIS et al., 2016).

El desempeño de HiMA se basa en el cambio drástico en su comportamiento reológico. Los polímeros SBS pueden absorber hasta diez veces su peso cuando se incorporan al asfalto. Por lo tanto, cuando se agrega 2.5% de polímero SBS al asfalto, el aglutinante modificado se comportará como si estuviera compuesto por un 25% de elastómero y un 75% de asfalto. En este caso, la fase predominante en la matriz asfalto-polímero seguirá siendo el asfalto y las características predominantes serán las del material bituminoso. Sin embargo, al agregar porcentajes superiores al 7.5% de SBS, el cemento asfáltico modificado se comportará predominantemente como un elastómero debido al fenómeno de inversión de fase (la fase polimérica predomina sobre el asfalto), con una verdadera red polimérica continua y resistente, como se muestra en la Figura 1. Las propiedades de HIMA incluyen alto punto de ablandamiento, alto módulo, alta elasticidad y extrema resiliencia (REIS et al., 2016).

Figura 2

Efecto del aumento del contenido de polímero SBS sobre la morfología del polímero /asfalto



Fuente: Kraton Performance Polymers, Inc. – 2012

La inserción de alto contenido de polímero en la matriz asfáltica tiene como objetivo desarrollar una red polimérica continua, actuando como refuerzo elástico en el ligante, lo que reduce la propagación de grietas por el ligante asfáltico. Como se puede observar en la Figura 2, los bajos contenidos de polímero desarrollan redes discontinuas, permitiendo la aparición de puntos débiles que permiten el avance de la fisura por parte del ligante (BŁAŻEJOWSKI et al., 2015). Según la revista *Infraestructura Urbana* (2017), la tecnología HiMA se ha permitido utilizar en varias aplicaciones de pavimentación debido a la combinación de su baja viscosidad y alto rendimiento mecánico. A continuación, se mencionan algunas de sus aplicaciones:

- En capas rodantes: es posible construir pavimentos con espesores menores y prestaciones iguales o superiores a los convencionales en cuanto a fisuración y deformación tipo "vía de rueda", debido al alto contenido de polímeros.

- En bases y aglutinantes: debido a su alta resistencia a la fatiga, la tecnología HiMA permite escalar capas más delgadas con mayor durabilidad.

- En tratamientos superficiales: la tecnología HiMA también se puede utilizar en tratamientos térmicos superficiales, por su alta cohesión y gran capacidad elástica junto con baja viscosidad son propiedades adecuadas para este propósito.

Según Silva (2018), los estudios muestran que la modificación de aglutinantes con el polímero SBS, en un contenido del 7,5%, constituyendo Cemento Asfáltico HiMA, le confieren propiedades que son capaces de resistir mayores niveles de deformación y, en consecuencia, obtener un servicio más prolongado. vida útil, también existe la posibilidad de una reducción en el espesor de la capa de asfalto para la misma vida útil en comparación con otros aglutinantes. Para Silva, los estudios no deben limitarse al ligante, ya que, si bien es el elemento principal del pavimento, se debe estudiar la mezcla asfáltica en su conjunto, ya que su composición puede resultar en diferentes características. Los asfaltos altamente modificados, denominados HiMA, siguen siendo en esencia asfaltos modificados, pero presentando diferencias clave que los distinguen de los AM, como la ya mencionada cantidad de polímero. A lo largo de este estudio (y en general en donde se han ensayado este tipo de ligantes), el HiMA se fabricó con un 7,5% en peso de polímero, lo cual es posible gracias a la mayor compatibilidad del SBS con el bitumen. Esta cantidad tiene como consecuencia un cambio de la estructura intermolecular del ligante altamente modificado: la matriz continua pasa a ser conformada por las cadenas de SBS y las moléculas del bitumen pasan a formar la fase dispersa, formando agrupaciones coloidales, como

se muestra en la Figura 1. Esto significa que las propiedades mecánicas del ligante son gobernadas en gran parte por la red polimérica, pudiendo llegar a mostrar mejorías con respecto a los AM, según muestran algunos estudios.

Este fenómeno se debe, según el informe del National Center for Asphalt Technology de Alabama, E.E.U.U., a ‘la fuerte interacción de los polímeros SBS con el bitumen que les permite llegar a absorber hasta 10 veces su propio volumen de componentes asfálticos no tan polares’.

Para que un asfalto realmente sea considerado altamente modificado, las cadenas poliméricas deben presentar un entrecruzamiento, que es lo que le otorga continuidad a la matriz. Se denomina entrecruzamiento o cross-linking de cadenas poliméricas al fenómeno en el cual éstas son unidas para formar una matriz reticulada continua en el sistema. También se lo puede denominar vulcanización, o curado de los elastómeros. Este fenómeno es necesario para poder denominar a un ligante como altamente modificado porque a grandes rasgos es la matriz polimérica la que confiere las propiedades deseadas.

Con el HiMA, el entrecruzado de las cadenas poliméricas se puede lograr de dos maneras. Una de ellas es por termocurado, que conlleva dejar reposar el ligante recién fabricado en molino a una temperatura de entre 190°C y 200°C por un tiempo que dependerá mayormente de la cantidad de asfalto con la que se cuente. El segundo método consiste en agregar azufre al final de la primera etapa de molienda y continuar con este proceso hasta llegar a las propiedades deseadas (de aquí la denominación vulcanización). El azufre oficia de puente entre las cadenas, ligándolas entre sí para obtener la matriz continua que impide el flujo desmedido de las moléculas, lo que otorga mayor rigidez y durabilidad.

Método de diseño Marshall

El Método de Diseño Marshall de acuerdo al Manual de Ensayo de Materiales aprobado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones nos permite: “Determinar a partir de la preparación y compactación de especímenes de mezcla bituminosa para pavimentación, de altura nominal de 64 mm y 102 mm de diámetro, el diseño de una mezcla asfáltica y calcular sus diferentes parámetros de comportamiento, por medio del método manual Marshall” (MTC E 504, p.583). Para el diseño de la mezcla asfáltica debe seleccionarse el agregado pétreo a una granulometría y un porcentaje de cemento asfáltico, con las cuales deben ser fabricadas en laboratorio y con las mismas propiedades obtenidas debe ser colocado en terreno definitivo; para la determinación de la dosificación del porcentaje del asfalto óptimo para una combinación de agregados se efectúan de acuerdo a las características seleccionadas.

Antes de la determinación del diseño de la mezcla, los componentes de la mezcla asfáltica como son los agregados y asfaltos deben ser caracterizados de acuerdo a los parámetros establecidos en el Manual de Ensayo de Materiales; según la metodología del ensayo Marshall, las mezclas asfálticas en caliente deben contener el agregado con tamaño máximo o inferior a 25mm; cuyo procedimiento debe ser aplicable para el diseño de mezcla asfáltica en laboratorio y así mismo para el control de la mezcla asfáltica en puesta en terreno definitivo.

Según el propósito del diseño de mezcla asfáltica, cuyos resultados obtenidos del ensayo Marshall como son la estabilidad y flujo deberán responder al promedio de un mínimo de tres probetas de 64mm de altura y 102mm de diámetro, para cada incremento que debe variar de 0.5% de porcentaje del contenido de asfalto; generalmente las mezclas asfálticas muestran un pico en la estabilidad con una cantidad determinado de contenido de asfalto, estos picos de contenidos de asfalto pueden ser promediados con los otros contenidos de asfalto para determinar la máxima

densidad y contenido de asfalto en los vacíos de la mezcla asfáltica. La preparación de las probetas debe realizarse de acuerdo al procedimiento establecido por la metodología, así como el calentamiento, mezclado y compactación; la temperatura de mezclado y compactación dependerán del cemento asfáltico a emplear para la fabricación de las probetas.

El proceso de compactación de la mezcla asfáltica en los moldes se realizará mediante el empleo del martillo Marshall, la misma que está compuesto por una base plana circular de 98.4 mm (3 7/8") de diámetro y una barra de eje central, en la cual está equipada con cilindro con hueco central montada sobre el eje central con un peso de 4.54 kg (10 lb), la cual tiene un recorrido de una altura de caída de 454.2mm (18"); todos estos elementos son de fabricación de material de acero. Las probetas se fabrican a una compactación de 75 golpes por cada cara, o salvo otra especificación según el tipo de tránsito de diseño.

Las principales características a evaluar del método del diseño Marshall son el análisis Flujo y Estabilidad de cada una de las probetas; la característica de la estabilidad representa la máxima resistencia a la deformación a una razón constante de carga de 50 mm/min, cuyo valor de la estabilidad es en función al tipo, calidad y gradación del agregado, así mismo la calidad y el porcentaje del asfalto empleado. Mientras que el flujo de la mezcla asfáltica es la medida a la deformación determinado durante el proceso del ensayo de estabilidad; el flujo se mide en unidades de 0.25 mm, la cual ocurre desde el momento en la que se aplica la carga necesaria hasta lograr la carga máxima.

Ensayo de Módulo Resiliente de las mezclas bituminosas (AASHTO TP-31)

El método sirve para determinar la deformación recuperable o elásticas bajo la acción repetida de cargas a una temperatura establecida a la cual es sometida la mezcla asfáltica compactada. Además, este parámetro es requerido en el procedimiento empírico de diseño de la Guía AASHTO 1993 y es uno de los principales datos de entrada para la Guía de diseño mecanístico empírico 2002, por lo que es “considerado como un elemento que caracteriza de manera racional el comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales que conforman la estructura” (LanammeUCR, 2007).

Ensayo de la Rueda Cargada

La determinación de la deformación permanente y el daño por humedad de la mezcla asfáltica en caliente se realiza mediante el ensayo de la Rueda Cargada (Hamburgo), cuyo procedimiento está establecida en la norma AASHTO T324 (2014) - Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA). La metodología de este ensayo establece el procedimiento para la evaluación de la susceptibilidad a la deformación permanente y el daño ocasionado por la humedad de las mezclas asfálticas en caliente, para lo cual se emplean probetas sumergidas bajo la acción de una rueda oscilante del equipo de rueda de Hamburgo; la metodología es aplicable para las probetas producidas en laboratorio mediante el compactador giratorio, así mismo se aplican para núcleos extraídos de campo de gran diámetro o probetas de placa extraídos del pavimento asfáltico.

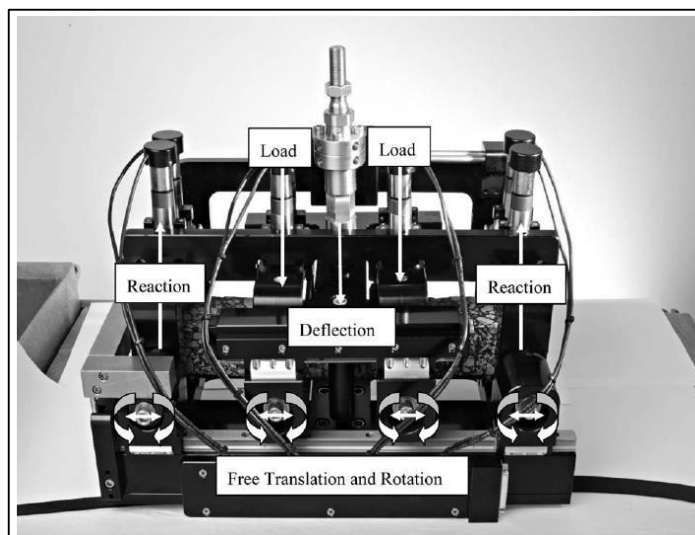
Ensayo de Flexión de Viga en Cuatro Puntos

Como se mencionó anteriormente, este método es el más utilizado para determinar el comportamiento de las mezclas asfálticas sometidas a cargas de fatiga. cuyo procedimiento está

establecido en la norma AASHTO T321-14. En esta prueba, se utiliza un equipo de ensayo a flexión en cuatro puntos de apoyo (Figura 3), en el cual las abrazaderas interiores y exteriores están colocadas simétricamente.

Figura 3.

Equipo de ensaye a fatiga a flexión en 4 puntos



Fuente: (ASTM, 2011).

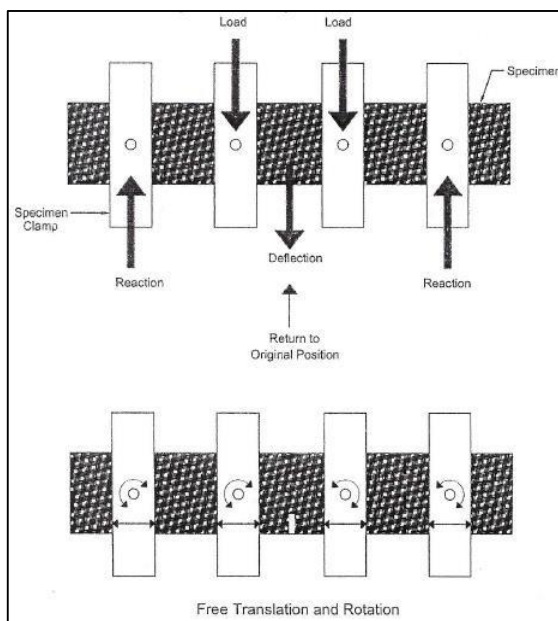
Para realizar este ensaye, se fabrican probetas prismáticas rectangulares esbeltas de dimensiones 380 ± 6 mm de longitud, 50 ± 2 mm de alto, y 63 ± 2 mm de ancho. La probeta prismática debe ser sometida a cargas periódicas de flexión en cuatro puntos, con rotación y traslación libres en todos los puntos de la carga y de la reacción de éstas. La flexión debe ser realizada por la aplicación de la carga en dos puntos interiores (abrazaderas interiores), en sentido vertical y perpendicularmente al eje longitudinal de la probeta. Se ha de fijar la posición vertical de los soportes del extremo (abrazaderas exteriores).

Durante el ensayo, se deberá registrar la carga necesaria para que la viga experimente una deformación constante en función de la deflexión del espécimen, se deberá de calcular a partir de estos valores el módulo de rigidez y el ángulo de fase en función de cada ciclo de carga. Con estas

mediciones se puede determinar las características de fatiga del material sometido a ensayo. En la Figura 4 se pueden observar los principios básicos del ensayo en flexión en cuatro puntos.

Figura 4

Principios básicos del ensayo a flexión en cuatro puntos



Fuente: (AASHTO, 2011).

Dentro de las especificaciones del ensayo se establece que la prueba deberá realizarse con una temperatura controlada, para una frecuencia de aplicaciones de carga sinusoidal. Los ensayos a realizar se efectúan comúnmente a una temperatura de 20.0 ± 0.5 ° C, pero también es posible realizar el ensayo a otras temperaturas de prueba. Así mismo, las especificaciones del ensayo establecen que la frecuencia de carga debe estar dentro de un rango de 5 a 10 Hz. Una vez realizado el ensayo, se puede obtener el valor inicial del módulo de rigidez a la flexión a partir de los valores medidos de esfuerzo, desplazamiento y el ángulo de fase en el ciclo de carga número 50 ($n=50$). Así mismo, el ensayo se continúa hasta que el módulo calculado se haya reducido hasta la mitad de su valor inicial o hasta la rotura de la probeta.

2.5 Definición de Términos Básicos

Asfalto: “Material cementante, de color marrón oscuro a negro, constituido principalmente por betunes de origen natural u obtenidos por refinación del petróleo. El asfalto se encuentra en proporciones variables en la mayoría del crudo de petróleo” (Glosario de términos MTC, 2018, p.4)

Polímero: Según (Glosario de términos MTC, 2018, p.18) Aditivo modificador del asfalto. Son sustancias de alto peso molecular formada por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas llamados monómeros (compuestos químicos con moléculas simples). Se forman así moléculas gigantes que toman formas diversas: cadenas en forma de escalera, cadenas unidas o termo fijas que no pueden ablandarse al ser calentadas, cadenas largas y sueltas. El costo, depende básicamente de su proceso de polimerización y la disponibilidad de los monómeros. Así, las principales fuentes de materia prima para la producción de monómeros son:

- Productos Naturales.
- Hulla o Carbón Mineral.
- Petróleo

Ensayo de Cántabro: Desgaste mecánico de un testigo de pavimento de mezcla asfáltica resultante de la fricción (AASHTO T165-97).

Estabilidad o Resistencia a la deformación permanente: Capacidad de una mezcla asfáltica compactada para resistir las cargas impuestas por el tránsito vehicular sin que se produzcan deformaciones permanentes. Esta propiedad depende principalmente de la cohesión de la mezcla y de la fricción interna entre las partículas de agregado. Resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas: La prueba tiene como objetivo determinar la resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas en caliente mediante el proceso de la fabricación y rotura de

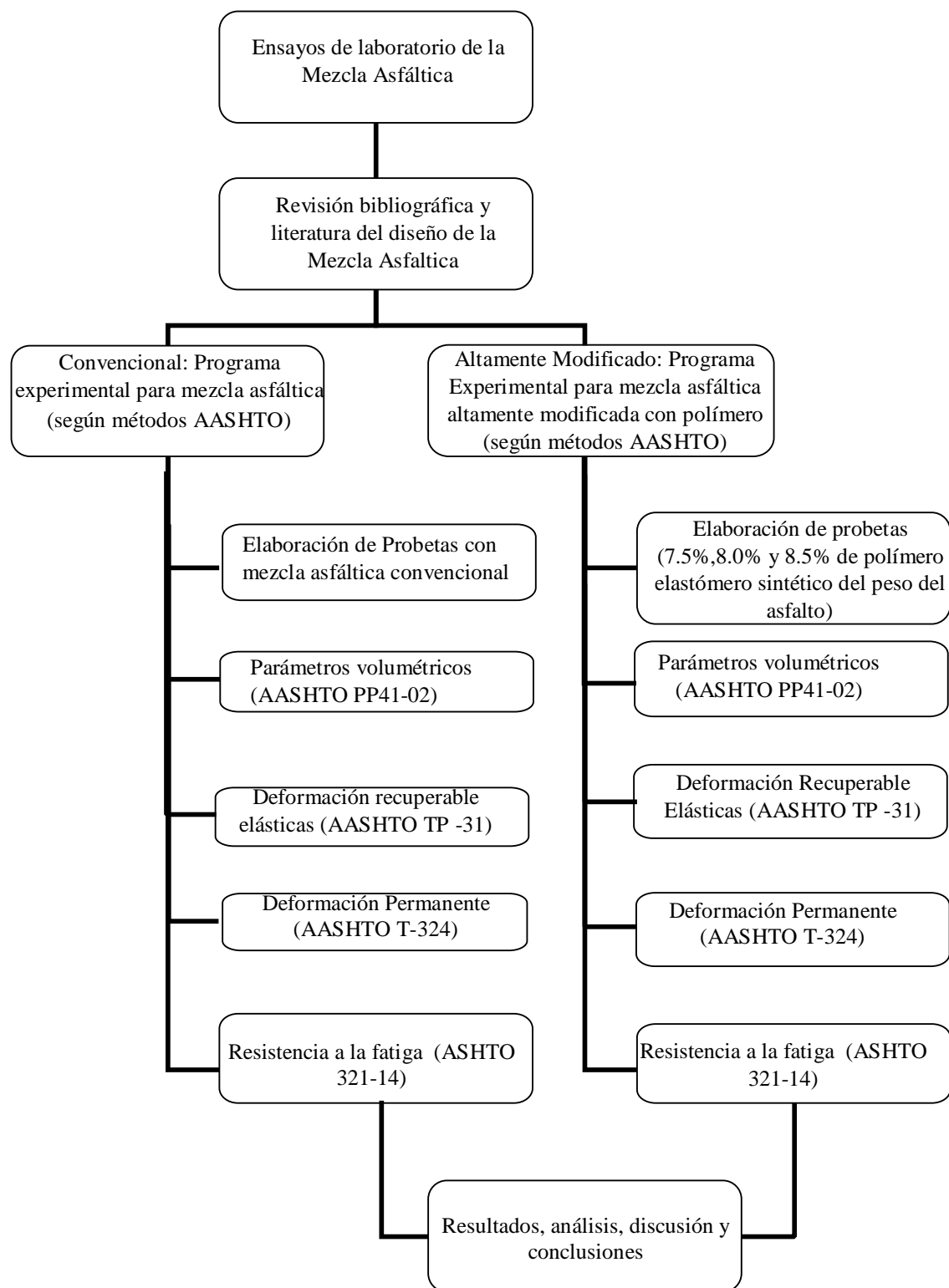
probetas empleando el aparato Marshall. Padilla (2010). Ensayo de ahuellamiento: “Surcos o huellas que se presentan en la superficie de rodadura de una carretera pavimentada o no pavimentada y que son el resultado de la consolidación o movimiento lateral de los materiales por efectos del tránsito” (AASHTO T 324, 2014)

Mezcla asfáltica en caliente: “Una mezcla en caliente procesada en planta u otros medios, compuesta por agregados gruesos y finos, material bituminoso y de ser el caso aditivos de acuerdo a diseño y especificaciones técnicas. Es utilizada como capa de rodadura y forma parte de la estructura del pavimento” (Zúñiga, 2015, p.18)

Mezcla asfáltica altamente modificada: “Una mezcla asfáltica en caliente, compuesta por agregados gruesos y finos, material bituminoso, polímeros con porcentajes mayores a 7.5% del peso del asfalto y de ser el caso aditivos de acuerdo a diseño y especificaciones técnicas.

2.6 Fundamentos Teóricos que Sustentan la Hipótesis (mapa conceptual)

Figura 5 – Mapa Conceptual



Capítulo 3 Sistema de Hipótesis

3.1 Hipótesis

3.1.1 *Hipótesis general.*

La adición de polímeros elastómero termoplástico sintético a una mezcla asfáltica altamente modificada incrementan sus propiedades físicas y mecánicas, determinados mediante ensayos de laboratorio.

3.1.2 *Hipótesis específicas*

- La adición de polímeros elastómeros termoplásticos sintéticos a una mezcla asfáltica altamente modificada incrementa la propiedad de resistencia a la deformación, determinadas mediante los parámetros de Estabilidad y flujo del ensayo Marshall.
- La adición de polímeros elastómero termoplástico sintética a una mezcla asfáltica altamente modificada incrementa la propiedad de resistencia a la deformación y flexión elástica, determinados mediante el Ensayo de Módulo Resilente.
- La adición de polímeros elastómero termoplástico sintética a una mezcla asfáltica altamente modificada incrementa la propiedad de resistencia al ahuellamiento permanente, determinados mediante el ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo.
- La adición de polímeros elastómero termoplástico sintética a una mezcla asfáltica altamente modificada incrementa la propiedad de resistencia a la fatiga, determinados mediante el ensayo de Flexión de Viga en Cuatro Puntos.

3.2 Sistema de Variables

El tipo de variable según su naturaleza del presente estudio está enmarcado en Variables Cuantitativas Continuas.

3.2.1 Definición conceptual y operacional

Variable independiente.

- Polímeros Elastómero Termoplástico Sintético

Variable cuantitativa continua: Se va a variar el porcentaje de incorporación de Polímeros Elastómero Termoplástico Sintético en proporciones mayores al 7.5 % respecto al peso del asfalto (7.5%,8.0% y 8.5%), a la mezcla asfáltica en caliente convencional para generar la mezcla asfáltica altamente modificada.

Variable dependiente.

- Propiedades físico y mecánicas de la mezcla asfáltica altamente modificada.

Variable cuantitativa – continua: Se evaluarán los parámetros para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla asfáltica altamente modificada.

3.2.2 Operacional de variables

Tabla 1 Operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Indicadores	Índices	Métrica	Instrumento	Herramienta
Variables Independientes: Polímeros Elastómero Termoplástico Sintético							
Modificación mediante adición de Polímeros Elastómero Termoplástico Sintético	Los polímeros: son sustancias de alto peso molecular formada por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas llamados monómeros (compuestos químicos con moléculas simples)	El polímero es un Aditivo modificador del asfalto. (Glosario de términos MTC, 2018, p.18)	✓ Adición de Polímeros Elastómero Termoplástico Sintético	✓ % de adición >7.5%	✓ %	Formatos	MANUAL EG-2013 DEL MTC
Variable dependiente: Propiedades físicas y mecánicas de la Mezcla Asfáltica Altamente Modificada							
✓ Resistencia a la deformación.	Propiedad de la mezcla asfáltica de resistencia a la deformación según de los parámetros Marshall.	Resistencia a la deformación según la estabilidad y fluencia mediante el ensayo Marshall.	✓ Estabilidad. ✓ Flujo.	✓ Deformación	✓ Kg ✓ mm	Formatos	MTC E 504 Manual de Ensayos de Materiales
✓ Resistencia a la deformación y flexión elásticas.	Propiedad de la mezcla asfáltica de resistencia a la deformación y flexión elásticas	Resistencia a la deformación y flexión elásticas de la mezcla asfáltica mediante el ensayo de Modulo Resilente	✓ Deformación y flexión elásticas.	✓ Deformación	✓ %	Formatos	(AASHTO TP -31)
✓ Resistencia al ahuellamiento	Propiedad de la mezcla asfáltica de resistencia al ahuellamiento	Resistencia al ahuellamiento por efectos de la rueda cargada mediante la prueba de Rueda Cargada	✓ % de ahuellamiento permanente	✓ % ahuellamiento	✓ %	Formatos	ASHTO T324
✓ Resistencia a la fatiga	Propiedad de la mezcla asfáltica de resistencia a la fatiga	Resistencia a la fatiga mediante el ensayo de Flexión de Viga en Cuatro Puntos	✓ % de rigidez a la flexión	✓ % rigidez	✓ %	Formatos	ASHTO 321-14

Capítulo 4 Metodología

4.1 Método de Investigación

El método de la investigación es: Deductivo; es el razonamiento que se inicia desde el marco general de referencia a lo individual; en este método se emplea para derivar de lo genérico a lo específico, de lo universal a lo individual; a través de este tipo de método de razonamiento se obtiene conclusiones, que se parte de lo general, aceptado como válido, hacia estudios particulares. Así mismo, este método se inicia con los estudios y análisis de los postulados, teoremas, leyes y principios de una aplicación universal y mediante el proceso de deducción, el razonamiento y las suposiciones, entre otros aspectos, se demuestra su validez para ser aplicados en forma individual y/o particular.

La orientación de la investigación es: Aplicada; la investigación aplicada que indaga o perfecciona recursos de aplicación del conocimiento ya obtenido mediante la investigación pura y por lo tanto, no busca la verdad, como la investigación pura, sino la búsqueda de la utilidad; en otras palabras, se trata de investigar las formas en que el saber científico producido por la investigación pura puede implementarse o aplicarse en la realidad para obtener un resultado práctico.

El enfoque cuantitativo de la investigación apuesta por una concepción global positivista, hipotética - deductiva, objetiva, particularista y orientada a los resultados para explicar ciertos fenómenos. Se desarrollará más directamente en la tarea de confirmar y demostrar las teorías por medio de estudios muestrales representativos. Aplica los test, entrevistas, cuestionarios, escalas para medir actitudes y medidas objetivas, utilizando instrumentos sometidos a pruebas de validez y confianza. En este

proceso se emplea las técnicas estadísticas para el análisis de datos y se generaliza los resultados obtenidos.

El método de recolección de datos es retrolectivo, cuando la obtención de la información es realizada una vez que la maniobra y el resultado ha ocurrido; para el caso de esta investigación se emplearan formatos pre establecidos según los manuales de Ensayo de Materiales - 2016 y el manual de Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG -2013.

4.2 Tipo de Investigación.

El tipo de la investigación es: Descriptiva – Correlacional – Explicativa. En un tipo de investigación descriptivo en la que se selecciona una serie de razones, conceptos o variables y que se evalúa cada una de ellas independientemente de las otras, con la finalidad de describirlos; este tipo de estudios busca especificar las propiedades significativas de las personas, grupos o cualquier otro fenómeno; es Correlacional porque tiene la finalidad de medir el grado de relación que existe entre las variables en el mismo tipo de muestra y así mismo es Explicativa porque es estructurada y proporcionarán información para comprender el fenómeno del estudio.

4.3 Nivel de Investigación.

El nivel de investigación es descriptivo en la que se selecciona una serie de razones, conceptos o variables y que se evalúa cada una de ellas independientemente de las otras, con la finalidad de describirlos; este tipo de estudios busca especificar las propiedades significativas de las personas, grupos o cualquier otro fenómeno; es Relacional porque tiene la finalidad de medir el grado de relación que existe entre las variables en el mismo tipo de muestra.

4.4 Diseño de la Investigación.

El diseño de la investigación es: Experimental – Longitudinales – Prospectivos.

Diseños experimentales: Campbell y Stanley (1966), el diseño experimental permite un grado mayor de control y, por tanto, los que permiten las comparaciones científicas más adecuadas. Las variables e indicadores admiten la manipulación intencional, gozan de gran constancia experimental y como consecuencia de ello su validez interna es elevada

Fundamentalmente son tres tipos, siendo estos los siguientes:

1. Diseño de grupo control pretest – postest.
2. Diseño de cuatro grupos de Solomom.
3. Diseño de grupo con postest únicamente.

Diseños longitudinales: Explican que los diseños longitudinales, son los que se determinan los datos a través del tiempo en puntos o periodos de control, para hacer relaciones respecto al cambio, sus determinaciones y sus consecuencias.

Estudio del diseño.

Es estudio del diseño de la investigación es: Estudio de Cohorte

Estudio de cohorte: Los grupos de estudio se definen por la exposición a la causa y se vigila la aparición del efecto (Causa – Efecto). Es el diseño de observación que más se acerca a la experimental; ya que, de una población de estudio elegible, se selecciona los individuos que están libres del evento de interés, y que además están expuestos o no a un factor determinado, que son seguidos en el tiempo, hasta que se registra la ocurrencia del evento o resultado (incidencia).

4.5 Población y Muestra

4.5.1 Población

Conjunto o grupo total de individuos, objetos o medidas que tienen características similares y/o comunes que son observados en un lugar y en un momento determinado; cuando se realiza una investigación se debe tener en cuenta algunas características fundamentales para la selección de la población en estudio. La población objeto de estudio en esta investigación estará constituida por la mezcla asfáltica modificada convencional y altamente modificada con distintos porcentajes de incorporación de polímeros elastómero termoplástico sintético.

- **Criterio de inclusión:** La población de estudio serán las mezclas asfálticas producidas en caliente con pen 60/70, las cuales son para el uso de las carpetas asfálticas.
- **Criterio de exclusión:** La población que serán excluidas serán las mezclas asfálticas en caliente producidas con otros tipos de asfalto (Pen).

4.5.2 Muestra

La muestra corresponde a un diseño experimental de asignación por conveniencia, cuya técnica es frecuentemente empleada; la misma que consiste en seleccionar una muestra de la población por el hecho de que sea posible; es decir, los individuos determinados para la investigación debe ser seleccionados los que se encuentran disponibles y no porque se haya seleccionado mediante un criterio estadístico; este tipo de selección se denomina por conveniencia, la misma que permite traducir con una gran facilidad operativa y costos menores en el muestreo, tiene como consecuencia la imposibilidad de hacer afirmaciones generales con rigor estadístico sobre la población.

Para el caso de esta la investigación se ha determinado el muestreo por conveniencia de acuerdo a lo diferentes estudios a realizar, la misma que se tiene establecido por el manual de Ensayo de Materiales - 2016 y el manual de Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG -2013 aprobadas por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones, siendo las siguientes muestras:

Tabla 2

Número de muestras para determinar el contenido óptimo de asfalto y polímero para el ensayo Marshall – MTC E 504.

Mezcla asfáltica % Polimeros	Porcentaje de asfalto óptimo (%)				
	4	4.5	5	5.5	6
0%	3	3	3	3	3
7.5%	3	3	3	3	3
8.0%	3	3	3	3	3
8.5%	3	3	3	3	3
Total	12	12	12	12	12

Fuente: Elaboración Laboratorio CAH.

Tabla 3

Número de muestras para el ensayo de Modulo resilente

Mezcla asfáltica % Polimeros	Porcentaje de asfalto óptimo (%)				
	4	4.5	5	5.5	6
0.0%	-	-	-	1	
7.5%	-	-	-	1	
8.0%	-	-	-	1	
8.5%	-	-	-	1	
Total				4	

Fuente: Elaboración Laboratorio CAH.

Tabla 4
Número de muestras para el ensayo de Rueda Cargada de la mezcla asfáltica altamente modificada – AASTHO T 324.

Mezcla asfáltica	Porcentaje de asfalto optimo (%)				
	4	4.5	5	5.5	6
% Polimeros					
0.0%	-	-	-	1	-
7.5%	-	-	-	1	-
8.0%	-	-	-	1	-
8.5%	-	-	-	1	-
Total				4	

Fuente: Elaboración Laboratorio CAH.

Tabla 5
Número de muestras para el ensayo de flexión repetida de viga en 4 puntos

Mezcla asfáltica	Porcentaje de asfalto optimo (%)				
	4	4.5	5.5	5.5	6
% Polimeros					
0.0%	-	-	-	2	-
7.5%	-	-	-	2	-
8.0%	-	-	-	2	-
8.5%	-	-	-	2	-
Total				8	

Fuente: Elaboración Laboratorio CAH.

Finalmente, la muestra total para el desarrollo de la presente investigación es de 76 unidades de testigos de mezcla asfáltica altamente modificadas.

4.6 Técnicas e Instrumentos de Recolección de datos

4.6.1 Técnicas.

La técnica empleada es la observación, donde se tiene en consideración la realización previa de los ensayos de caracterización de agregados y el cemento asfáltico de acuerdo al Manual de Ensayo de Materiales – 2016, en la cual se dio el inicio con el

diseño de mezcla asfáltica convencional con la finalidad de comparar las propiedades de esta mezcla asfáltica altamente modificadas, para ello se realizarán previamente los ensayos de Inmersión - compresión para establecer la temperatura y tiempo de digestión de la mezcla asfáltica, seguidamente se empleará la metodología del ensayo Marshall para establecer de los parámetros de comportamiento de la mezcla asfáltica (estabilidad, fluidez, densidad, vacíos de la mezcla, y vacíos del agregado mineral) en las mezclas asfálticas modificadas convencional y altamente modificada, con cuyos valores se determinarán el porcentaje óptimo de asfalto y así mismo el porcentaje óptimo de polímeros. Con los valores de los diseños óptimos de ambas mezclas asfálticas, se debe proceder a evaluar su comportamiento mediante los ensayos de caracterización y desempeño: ensayo de ensayo de Modulo resiliente, el ensayo de la Rueda Cargada y ensayo de flexión repetida de viga en 4 puntos, donde debe observarse el fenómeno causado por la modificación de la mezcla asfáltica con diversos porcentajes mayores a 7.5%, la información obtenida se registrará para su análisis correspondiente.

4.6.2 Instrumentos.

La recolección de datos a emplearse serán las fichas y/o formatos para recolección de información primaria establecidas en el Manual de Ensayo de Materiales – 2016, así también se tomará en cuenta los formatos que ya están establecidos por las normas nacionales e internacionales, donde se registrarán los resultados de todos ensayos que se realizarán para determinar el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas.

4.7 Descripción de Procedimiento de Análisis de Datos

Los ensayos Marshall, ensayo de Resistencia a Compresión Diametral, ensayo de Cántabro y el ensayo de Rueda Cargada permitirán obtener datos diversos que serán

analizados y procesadas empleando la estadística descriptiva - correlacional, para lo cual se empleará el cálculo estadístico de T de Student.

Los datos obtenidos y el cálculo estadístico se realizarán con el Software como el SPSS, Excel, Word, etc., con la cual se presentaron los resultados mediante gráficos estadísticos de barras, gráficos lineales, histogramas, áreas, etc., de los siguientes indicadores:

- Variación de la estabilidad y flujo con respecto al porcentaje de polímeros.
- Variación de resistencia a la a la deformación recuperable elásticas al porcentaje de polímeros.
- Variación del ahuellamiento permanente con respecto al porcentaje de polímeros.
- La variación de la resistencia a la fatiga por flexión repetida al porcentaje de polímeros.

Procedimiento de determinación el comportamiento de la resistencia a la deformación de mezcla asfáltica según el ensayo Marshall.

La determinación de la resistencia a la deformación de la mezcla asfáltica según el ensayo Marshall, se desarrolla de acuerdo al procedimiento determinado según la sección MTC 504 del Manual de Ensayo de Materiales – 2016, para lo cual se realiza la preparación y compactación de las probetas de la mezcla asfáltica en caliente para la una pavimentación, a partir del diseño de la mezcla asfáltica y determinar los diferentes parámetros de su comportamiento. Según los parámetros Marshall se evalúan durante el proceso del diseño de la mezcla asfáltica son: Estabilidad, Fluidez, entre otros.; el procedimiento a seguir es la siguiente:

- Preparación de agregados: Los agregados deben ser secados; el proceso de secado debe realizar en horno con temperaturas de 105 °C a 110 °C., una vez concluida con el secado, se procede a separar los agregados por el proceso de tamizado en seco de acuerdo a las fracciones deseadas, las fracciones mínimas encontrarse dentro del rango siguiente:

25mm a 19 mm (1" a 3/4")

19mm a 12,5 mm (3/4" a 1/2")

12,5mm a 9,5 mm (1/2" a 3/8")

9,5mm a 4,75 mm (3/8" a No.4)

4,75mm a 2,36 mm (No.4 a No.8)

2,36 mm (pasante la No.8)

- Para determinar la temperatura de mezclado y compactación, el procedimiento a seguir es lo establecida según el Ítem 6.1.2 de la noma MTC E 504.
- Preparación de la mezcla: La preparación de la mezcla se realiza de acuerdo al procedimiento especificado, así como el mezclado y la compactación según el Ítem 6.1.3 de la norma MTC E 504.
- Compactación de los especímenes: El proceso de compactación del material en los moldes se realiza empleando el martillo Marshall, la misma que es un dispositivo de acero, formado por una base plana y circular de 98.4 mm (3 7/8") de diámetro, equipado con un peso de 4.54 kg (10 lb) y construido de modo de obtener una altura de caída de 454.2 mm (18"); las probetas debe ser compactados a 75 golpes por cada cara (lado).

- Ensayo de estabilidad y flujo: Las dos propiedades principales del método Marshall de un diseño asfáltico a evaluarse es la estabilidad determinara la máxima resistencia a la deformación a razón constante de carga a 50mm/min.; mientras que la propiedad del Flujo es la medida a la deformación de la mezcla asfáltica determinada según el ensayo de estabilidad.

Procedimiento para determinar la deformación recuperable elástica bajo acción repetida de cargas de mezcla asfáltica mediante el Ensayo de Módulo Resiliente de las mezclas bituminosas (AASHTO TP-31).

“Los materiales que constituyen los pavimentos se ven sometidos a cargas dinámicas de diversas magnitudes que le son transmitidas por el tráfico con el fin de tener en cuenta la naturaleza cíclica de las cargas que actúan en los materiales que conforman una estructura de pavimento, así como el comportamiento no lineal y resiliente de los materiales” (Universidad Politécnica de Catalunya, 2005).

El método sirve para determinar la deformación recuperable o elásticas bajo la acción repetida de cargas a una temperatura establecida a la cual es sometida la mezcla asfáltica compactada. Además, este parámetro es requerido en el procedimiento empírico de diseño de la Guia AASHTO 1993 y es uno de los principales datos de entrada para la Guía de diseño mecanístico empírico 2002, por lo que es “considerado como un elemento que caracteriza de manera racional el comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales que conforman la estructura” (LanammeUCR, 2007).

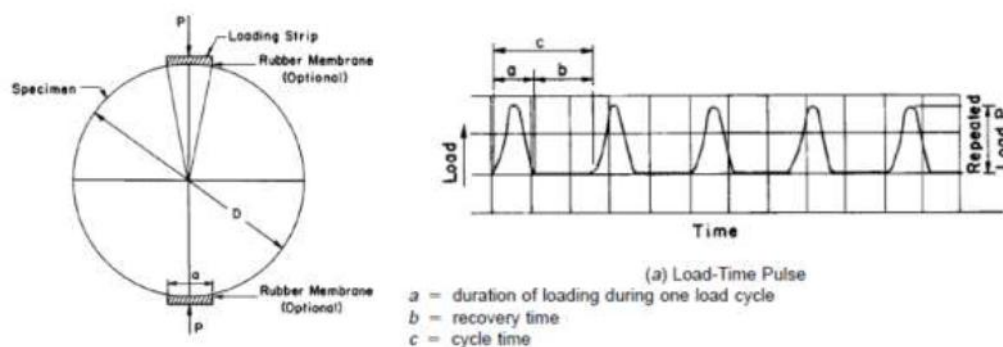
El ensayo consiste en tener las proporciones óptimas de contenido de asfalto y de los componentes pétreos, para luego compactar especímenes. La temperatura indicada para determinar los ensayos se determina previamente para luego ser sometida a ciclo de

carga y descarga con periodos de reposo. Las muestras son sometidas a carga diametral por compresión indirecta. Aunque es posible hacer ajustes en la duración de los pulsos de carga y en la temperatura, las normas usualmente fijan como condiciones iniciales un pulso de carga de 0.1 segundos, seguido por un periodo de reposo de 0.9 segundos y la realización del ensayo a 25°C (Sanchez & Campagnoli, 2016). La temperatura de ensayos de los módulos de resiliencia, se basa en las normas siguientes:

- Manual de carreteras-especificaciones técnicas para la construcción EG-2013
- La mezcla definida como óptima, deberá ser verificada con la medida de su módulo resiliente. El valor del módulo es determinado según la norma de ensayo ASTM D 4123-82 (1995).
- Metodología AASHTO 1993.
- Según esta metodología se requiere que el módulo resiliente sea determinado a temperatura de 68°F o 20° C, y basado en la norma (ASTM D 4123-82, 1995).

Figura 6

Prueba de módulo resiliente según la norma ASTM D4123-82



Fuente: ASTM D 4123-82, 1995.

Procedimiento de evaluación del ahuellamiento de mezcla asfáltica mediante el ensayo de la Rueda Cargada de Hamburgo.

La evaluación de la susceptibilidad a la deformación permanente y el daño por humedad de mezcla asfáltica en caliente se evalúan en función a los procedimientos determinados por la norma AASHTO T324 (2014) - Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA).

La descripción del procedimiento de este método establece la evacuación de la susceptibilidad de la deformación permanente y así mismo el daño por humedad de mezclas asfálticas en caliente empleando probetas sumergidas bajo la acción de una rueda oscilante del equipo de la rueda Cargada; el procedimiento es aplicable para probetas compactadas en laboratorio usando en compactador giratorio, así mismo también se emplean para núcleos extraídos de campo de gran diámetro o probetas de placa extraídos de un pavimento.

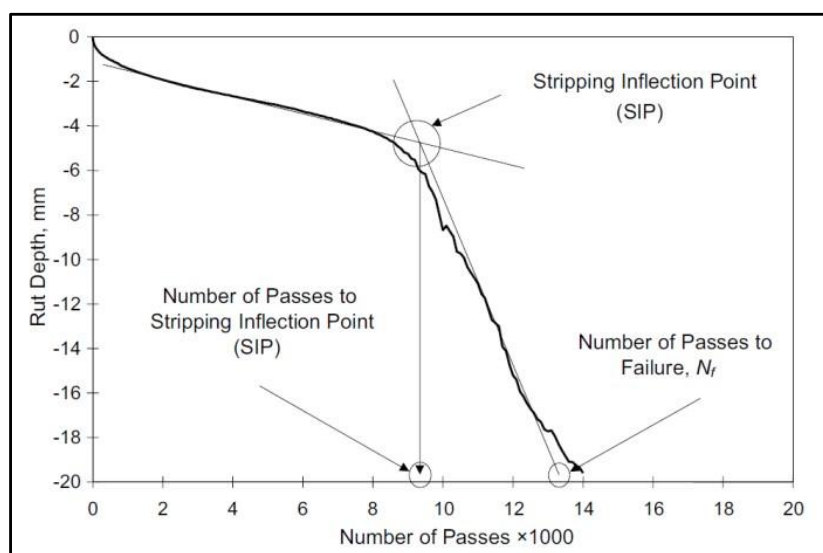
La metodología es empleada para establecer la susceptibilidad a la falla prematura de una mezcla asfáltica en caliente, motivada por la débil composición de la estructura de los agregados, la rigidez inadecuada del cemento asfáltico o el efecto del daño por humedad. Con el procedimiento del ensayo se determina la profundidad de ahuellamiento con respecto a un número de pasadas hasta el momento de la falla. Así mismo, los potenciales a los efectos producidos por daño por humedad son evaluados debido a que este ensayo se realiza sumergido en agua a una temperatura determinada y controlado durante la aplicación de la carga; el proceso del ensayo consiste en:

- Las muestras a someter al ensayo son las probetas cilíndricas de mezcla asfáltica en caliente cuyas dimensiones es de: 150 mm de diámetro y espesor de 38 mm hasta 100 mm compactado mediante el equipo compactador giratorio; o un bloque cortado del sitio de 320 mm de largo, 260 mm de ancho y espesor de 38 mm hasta 100 mm; o un núcleo extraído del pavimento de 300 mm, 250 mm o 150 mm de diámetro y espesor de 38 mm hasta 100 mm.
- El equipo de ensayo donde es sumergido en un baño de agua a una temperatura controlada de 50 °C (pre acondicionamiento de 30 min antes del ensayo) o una temperatura específica de acuerdo con el ligante asfáltico utilizado.
- Luego es cargado repetidamente empleando una llanta de acero oscilatoria en condiciones sumergidas en agua (una rueda de 203.2 mm de diámetro, 47 mm de ancho y una carga de 705 N sobre una muestra de ensayo), donde la rueda hará aproximadamente 52 pasadas por minuto sobre la probeta. Existen dos condiciones de término de ensayo, prevaleciendo la que ocurre primero; una es alcanzar las 20 000 pasadas de rueda (10 000 ciclos de ida y vuelta) y la otra es alcanzar la profundidad de ahuellamiento de 12.5 mm.
- Durante la ejecución del ensayo es medida el ahuellamiento de la probeta que es causada por la carga de la rueda, luego se realiza la gráfica en función del número de pasadas de la llanta.
- El incremento abrupto de la pendiente de la curva de la deformación concuerda con el desprendimiento de la película de ligante asfáltico que recubre las partículas del agregado.
- La resistencia a la deformación plástica se mide por la profundidad de la huella generada tras las repetidas pasadas de la rueda de ida y vuelta, mientras que, para

determinar la susceptibilidad a la humedad, el parámetro indicador es el punto donde se genera el desprendimiento de la película de asfalto que recubre las partículas de agregado (debido a la penetración del agua) o “Stripping Inflection Point (SIP)”. Este punto marca el inicio del ataque del agua en la mezcla asfáltica, que afecta directamente la adherencia entre el agregado y el asfalto, lo cual se representa gráficamente en la figura siguiente:

Figura 7.

Curva de Hamburgo (Rueda cargada) con parámetro de prueba.



Fuente: Norma AASTHO T324.

- La caracterización de la mezcla asfáltica con respecto a su resistencia a la deformación plástica acumulada, solo es relevante lo que ocurre antes del Stripping Inflection Point (SIP). La deformación que se produce después de este punto, se debe al desprendimiento del agregado sin aporte de asfalto (disgregación de la mezcla asfáltica).

Procedimiento de evaluación de pérdida de resistencia a la Fatiga de mezclas asfálticas mediante ensayo de flexión de viga en cuatro puntos.

Como se mencionó, la fatiga se define como la pérdida de resistencia de un material cuando está sometido a la aplicación de cargas repetidas. La resistencia a la fatiga es una de las propiedades más importantes en lo que se refiere al diseño de pavimentos. Este ensayo trata de caracterizar el comportamiento de las mezclas asfálticas sometidas a cargas de fatiga en un equipo de flexión en cuatro puntos, utilizando probetas de forma prismática. Las vigas pueden ser ensayadas a diferentes niveles de esfuerzo o deformación en base al modo de prueba. Los resultados del ensayo se utilizan para establecer una ley de fatiga para cada tipo de mezcla asfáltica.

El modo de carga a esfuerzo constante se considera aplicable a carpetas asfálticas usualmente mayores de entre 6 a 8 pulgadas, en tanto que el modo de prueba a deformación constante se considera aplicable a capas asfálticas de menos de 2 pulgadas (Geotechnical Consulting and Testing Systems, 2007). En nuestro caso, para nuestra investigación estaremos aplicando un modo de prueba a deformación controlada toda vez que en Perú se aplican regularmente carpetas de tipo delgadas de espesor promedio de entre 2”.

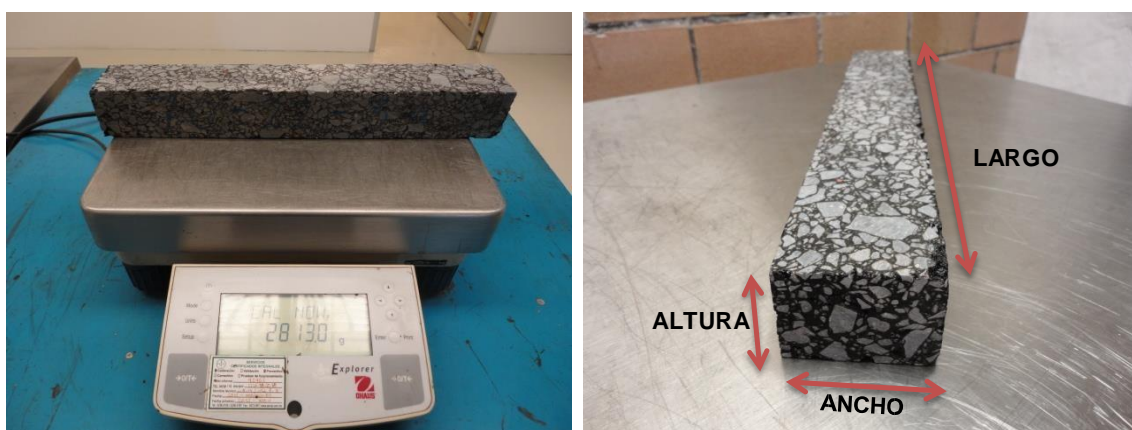
Este ensayo es el más recomendado para caracterizar la vida a fatiga de las mezclas asfálticas. La flexocompresión se realiza por medio de la aplicación de carga en dos puntos interiores (mordazas interiores), en sentido vertical y perpendicular al eje longitudinal de la probeta. La configuración de la carga crea un momento constante, y por lo tanto, una deformación constante entre las mordazas interiores. Esta carga aplicada debe variar de forma sinusoidalmente. Durante el ensayo, la carga necesaria para la

flexión de la probeta, la deflexión y el desfase (ángulo de fase) entre estas dos señales, se debe medir en función del tiempo.

Antes de iniciar el ensayo, los especímenes se deben colocar en un cuarto a temperatura ambiente 20.0 ± 0.5 ° C durante 2 horas para asegurar que se encuentren a la temperatura de ensayo al momento de la prueba. Los especímenes deben ser pesados y registradas sus dimensiones: ancho, largo y altura.

Figura 8

Probeta primatica (pesado y dimensionamiento).



El equipo que se utilizó para efectuar el ensayo de fatiga, se le conoce como UTM “Universal Testing Machine” y se ocupa comúnmente para llevar a cabo pruebas de fatiga y de módulo dinámico. El sistema de esta máquina tiene cuatro componentes principales: El sistema de control de adquisición de datos (CADS), el sistema hidráulico, la computadora y la cámara ambiental.

En esta investigación, la prueba de fatiga a flexión se realizó bajo el modo de deformación controlada, de tal manera que las vigas de 50 mm de alto, 63 mm de ancho y 380 mm de largo, obtenidas de los slabs compactados se ensayan en la máquina de prueba universal. Un sensor LVDT se utilizó para medir las diferentes deflexiones a partir

del eje neutral del espécimen. La carga aplicada por el actuador se controla a partir del sistema de control de adquisición de datos (CADS), de tal forma que la deformación en la fibra extrema de la viga es constante e igual a la deformación deseada. El ensayo de fatiga a flexión se realizó utilizando el equipo de fatiga por flexo-compresión a cuatro puntos de apoyo el cual fue proporcionado por el laboratorio de la empresa CAH. En la mayoría de los casos la prueba se ejecutó a 1'000,000 (un millón) de ciclos o hasta que la rigidez se reduzca a un 50% de la rigidez original. Por lo tanto, para un mismo asfalto tenemos 12 probetas a ensayar a flexión. Finalmente, los resultados que se obtienen una vez ensayadas las probetas son:

- Módulo de rigidez inicial.
- Deformación inicial (impuesta).
- No. de ciclos al fallo (de acuerdo al criterio de fallo establecido en la Norma AASHTO Designation: T 321-07, éste se produce cuando se alcanza la reducción del 50% del módulo inicial).

A partir de estos datos, se dibuja la gráfica “Módulo de rigidez-Número de ciclos hasta el fallo” para cada tipo de mezcla y se calcula la ley de fatiga de las mezclas mediante el gráfico “Deformación-Número de ciclos hasta el fallo”. Este último gráfico, mediante el cual obtenemos la ley de fatiga de cada una de las mezclas, se traza como una aproximación lineal de los resultados puntuales obtenidos (correspondientes cada uno de ellos a cada una de las probetas ensayadas).

5.0 Resultados y análisis de resultados

5.1 Resultados

5.1.1 Resultado de la resistencia a la deformación de la mezcla asfáltica en caliente mediante los parámetros de Estabilidad y Flujo del ensayo Marshall.

Materiales para la mezcla asfáltica.

a) Cemento asfáltico.

El material de cemento asfáltico corresponde a PEN 60/70, el cual es proveniente de la Refinería La Pampilla S.A.A. del lote de producción 003-01-2021, cuya certificación del reporte del análisis del cemento asfáltico es de 30/09/2021 por el laboratorio de REPSOL, cuyas características principales se muestra en el cuadro siguiente:

Tabla 6

Resultado de ensayo de caracterización del cemento asfáltico PEN 60/70.

Ensayos	Método ASTM/MTC	Und.	Especificación		
			Mín.	Máx.	Resultado
Penetración	D-5 / E304	dmm	60	70	61
Ductibilidad a 25°C	D-113 / E306	cm	100	-	>105
Gravedad esp. a 15.6°C	D-70	-		reportar	1.0247
Punto de inflamación	D-92/E312	°C	232	-	279.0
Gravedad API, °API	D-70	-		reportar	6.6
Punto de ablandamiento	D-36	-	-	-	51.3
Viscosidad cinemática a 100°C	D-445	cSt	-	-	4917
Viscosidad cinemática 135 °C	D-2170	cSt	200	-	533
Perdida por calentamiento	D-1754	%	-	0.8	0.26
Penetración retenida	D-5/E304	-	52	-	75.4
Ductilidad del residuo	D-113/E306	cm	50	-	50.5
Solubilidad en tricloroetileno	D-2042/E302	%	99	-	99.89
Índice de penetración	UNE 104	-		-	-0.4
Ensayo de la mancha	AASHTO T102	-		-	20% xileno, negativo

Fuente: Reporte de análisis de cemento asfáltico - Refinería La Pampilla S.A.A.

b) Agregados.

Los agregados seleccionados para el diseño de la mezcla asfáltica, así como el agregado grueso y agregado fino corresponden al material producido en la cantera Intrein CAH, los cuales fueron caracterizados por su laboratorio de Suelos y Asfaltos.

De las especificaciones que deben cumplir los materiales, así como el agregado grueso y fino empleado en la fabricación de la mezcla asfáltica en caliente, se aplicará lo especificado en el Manual de Carreteras – Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción EG 2013, Subsección 415.02(a), cumpliendo los requerimientos establecidos en las tablas 423.01 y 423-02 para Agregado grueso y Agregado fino respectivamente.

b.1) Agregado grueso

El agregado grueso debe cumplir con los requerimientos siguientes:

Tabla 7
Requerimiento para el agregado grueso

Ensayos	Norma		Requerimiento < 3000msnm
	MTC	ASTM - AASHTO	
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	MTC E 209	ASTM C-88	18% máx.
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	ASTM C-131	40% máx.
Adherencia	MTC E 519	ASTM D 1664	<95
Índice de Durabilidad	MTC E 214	-	35% mín.
Partículas chatas y alargadas (1)	-	ASTM D-4791	10% máx.
Caras fracturadas (< 3 millones, de EE)	MTC E 210	(ASTM D-5821)	85 / 50
Sales Solubles Totales	MTC E 219	ASTM D 1888	0.5% máx.
Absorción	MTC E 206	ASTM C 118	1.0% máx.

Fuente: Adaptado de la Tabla 423.01 del Manual EG 2013

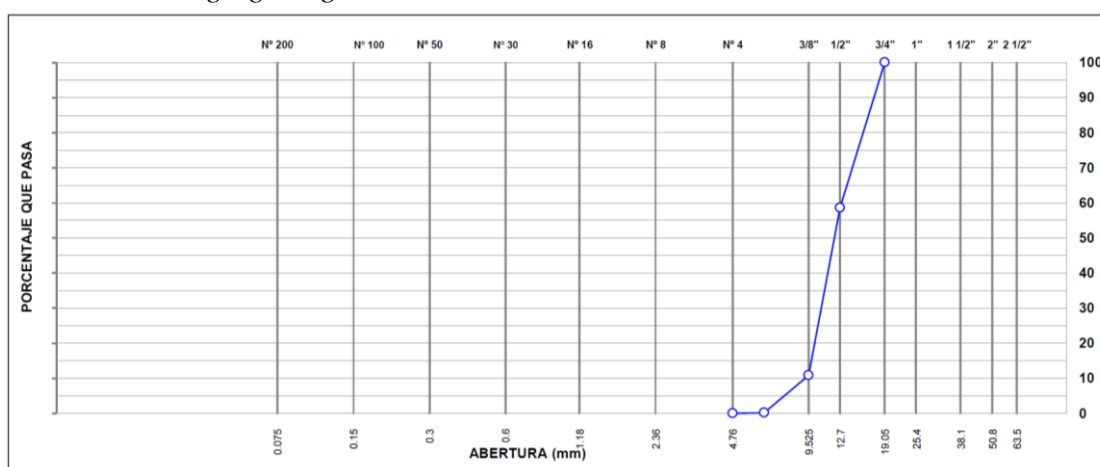
El agregado grueso determinado para la presente investigación es el procedente de la cantera Intrein CAH, la misma que corresponde a una grava triturada al 100% por una planta chancadora secundaria.

Tabla 8
Gradación del agregado grueso TM 3/4".

Tamiz		PESO RET.	% RET PARC.	%RET ACUM.	% PASA
ASTM	mm				
3/4"	19.050	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2"	12.700	1,505.7	41.4	41.4	58.6
3/8"	9.525	1,736.6	47.8	89.2	10.8
1/4"	6.300	387.0	10.6	99.8	0.2
# 4	4.760	7.3	0.2	100.0	0.0
Total		3,636.6			

Fuente: Reporte de análisis de granulométrico.

Figura 9
Gradación del agregado grueso

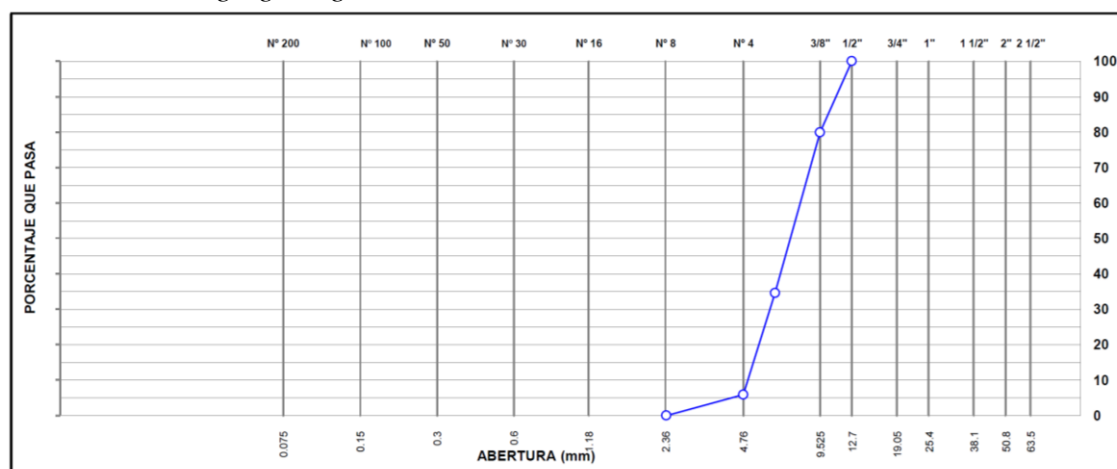


Fuente: Informe de laboratorio de suelos y pavimentos de CAH.

Tabla 9
Gradación del agregado grueso TM 1/2".

Tamiz		PESO RET.	% RET PARC.	%RET ACUM.	% PASA
ASTM	mm				
1/2"	12.700	0.0	0.0	0.0	100.0
3/8"	9.525	810.9	20.1	20.1	79.9
1/4"	6.300	1,830.9	45.3	65.4	34.6
# 4	4.760	1,159.7	28.7	94.1	5.9
# 8	2.380	236.9	5.9	100.0	0.0
Total		4,038.4			

Fuente: Reporte de análisis de granulométrico.

Figura 10*Gradación del agregado grueso*

Fuente: Informe de laboratorio de suelos y pavimentos.

Tabla 10*Verificación de las características físicas del agregado grueso.*

Ensayo	Norma	Requerimiento	Resultado	Criterio de aceptación
Durabilidad (Sulfato de magnesio)	MTC E209	18% máx.	4.90	Cumple
Abrasión	MTC E207	40% máx.	20.60	Cumple
Índice de durabilidad	MTC E214	35% máx.	63.0	Cumple
Partículas chatas y alargadas	MTC E211	10% máx.	6.7	Cumple
Caras fracturadas	MTC E210	85 / 50	91.2 / 83.0	Cumple
Sales solubles	MTC E219	0.5% máx.	0.014	Cumple
Adherencia	MTC E519	>95%	+95	Cumple
Absorción (*)	MTC E206	1.0% máx.	0.77	Cumple

Fuente: Reporte de análisis de granulométrico

b.2) Agregado fino

Los agregados finos deberán cumplir con los requerimientos establecidos por el Manual de carreteras - Especificaciones Técnicas EG 2013 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, los cuales se muestran en tabla siguiente:

Tabla 11
Requerimientos para el agregado fino

Ensayos	Norma		Requerimiento
	MTC	ASTM - AASHTO	< 3000 msnm
Equivalente de Arena	MTC E 209	AASHTO – 176	60% min
Angularidad del Agregado fino	MTC E 222	-	30% min
Azul de metileno	-	AASHTO TP-57	8 máx.
Índice de Plasticidad (malla N°40)	MTC E 111	ASTM D 4318	NP
Durabilidad (al sulfato de Magnesio)	MTC E 209	-	-
Índice de Durabilidad	MTC E 214	-	35% mín.
Adhesividad (Riedel Weber)	MTC E 220	NLT 355-74	4% mín.
Índice de Plasticidad (malla N°200)	MTC E 111	ASTM D 4318	4% máx.
Sales Solubles Totales	MTC E 219	ASTM D 1888	0.5% máx.
Absorción	MTC E 205	ASTM C 118	0.5% máx.

Fuente: Adaptado de la Tabla 423.02 del Manual EG 2013

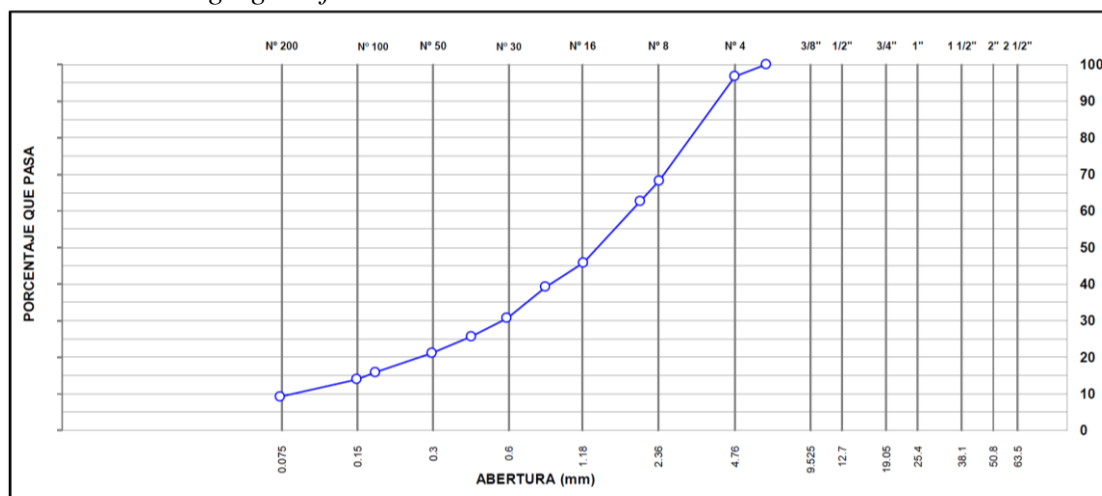
Los agregados finos empleados son los materiales producidos mediante el proceso de chancado al 100% y provienen de la cantera Intrein CAH.

Tabla 12
Gradación del agregado grueso TM 1/2".

Tamiz		PESO RET.	% RET. PARC.	%RET. ACUM.	% PASA
ASTM	mm				
1/4"	6.350	0.0	0.0	0.0	100
# 4	4.760	17.5	3.2	3.2	96.8
# 8	2.380	154.8	28.5	31.8	68.2
# 10	2.000	30.6	5.6	37.4	62.6
# 16	1.180	91.1	16.8	54.2	45.8
# 20	0.840	35.6	6.6	60.8	39.2
# 30	0.600	46.2	8.5	69.3	30.7
# 40	0.420	27.3	5.0	74.3	25.7
# 50	0.300	24.5	4.5	78.8	21.2
# 80	0.180	28.5	5.3	84.1	15.9
# 100	0.150	10.5	1.9	86.0	14.0
# 200	0.075	25.7	4.7	90.8	9.2
< # 200	(ASTM C- 117)	50.1	9.2	100.0	0.0
Total		542.4			

Fuente: Reporte de análisis de granulométrico

Figura 11
Gradación del agregado fino



Fuente: Informe de laboratorio de suelos y pavimentos.

Table 13
Verificación de la característica física del agregado fino.

Ensayo	Norma	Requerimiento	Resultado	Criterio de aceptación
Equivalencia de arena	MTC E114	60% min.	69	Cumple
Angularidad	MTC E222	30% min.	45.5	Cumple
Índice de plasticidad (malla No.40)	MTC E111	NP	NP	Cumple
Durabilidad (al sulfato de Magnesio)	MTC E209	-	3.5	Cumple
Índice de durabilidad	MTC E214	35% min.	49.0	Cumple
Adhesividad (Riedel Weber)	MTC E220	4% min	6.0	Cumple
Índice de plasticidad (malla No. 200)	MTC E111	4% máx.	NP	Cumple
Sales solubles	MTC E219	0.50% máx.	0.049	Cumple
Absorción	MTC E205	0.50% máx.	0.44	Cumple

Fuente: Reporte de análisis de granulométrico

b.3) Combinación de agregados.

La combinación de agregados se realizó de acuerdo al huso granulométrico de acuerdo al diseño de Huso MAC-2 (usarse en primera capa). Para este diseño se empleó cemento asfáltico PEN 60/70, la combinación de agregados obtenida para este diseño fue la siguiente dosificación:

Tabla 14*Porcentajes de los agregados para el diseño de Huso MAC-2.*

Agregados	%
Piedra Chancada 3/4" Cantera Intrein	15.0%
Piedra Chancada 1/2" Cantera Intrein	28.5%
Arena Triturada < 1/4" – 3/16"- Cantera Intrein	56.5%
Total de agregados	100.0%

Fuente: Elaboración propia.

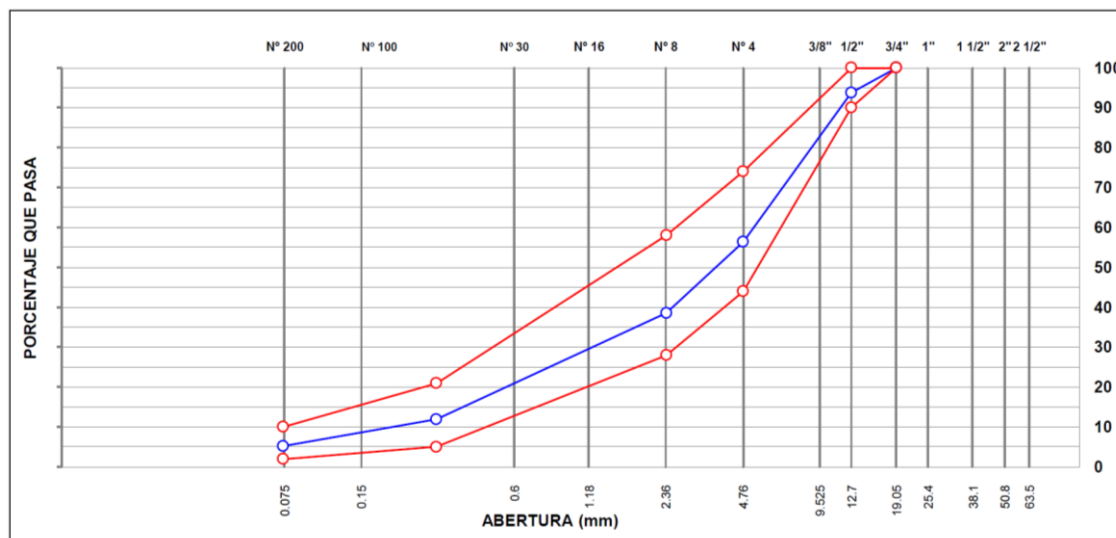
El cemento asfáltico a utilizar tiene un óptimo de 5,50%, los agregados fueron 100% de la Cantera Intrein. Se verifico que el porcentaje de vacíos sea el adecuado para la mezcla, De acuerdo a la combinación teórica obtenida se realizó la comprobación física de la mezcla asfáltica, se combinó los agregados de acuerdo a las proporciones determinadas teóricamente; de cuyos resultados se logró obtener los siguientes:

Tabla 15*Combinación teórica de los agregados (Huso MAC-2.)*

ASTM	Tamiz	% RET. PARC.	%RET. ACUM.	% PASA	ESPECIFICACION	
	mm				ASTM D-3515	D5
3/4"	19.050			100	100	100
1/2"	12.700	6.2	6.2	93.8	90	100
3/8"	9.525	12.9	19.1	80.9		
1/4"	6.350	14.5	33.6	66.4		
# 4	4.760	10.0	43.7	56.3	44	74
# 8	2.380	17.8	61.4	38.6	28	58
# 10	2.000	3.2	64.7	35.3		
# 16	1.180	9.5	74.2	25.8		
# 20	0.840	3.7	77.9	22.1		
# 30	0.600	4.8	82.7	17.3		
# 40	0.420	2.8	85.5	14.5		
# 50	0.300	2.6	88.1	11.9	5	21
# 80	0.180	3.0	91.1	8.9		
# 100	0.150	1.1	92.2	7.8		
# 200	0.075	2.7	94.8	5.2	2	10
< # 200	(ASTM C-117)	5.2	100.0	0.0		

Fuente: Informe de laboratorio de suelos y pavimentos .

Figura 12
Gradación de los agregados combinados



Fuente: Informe de laboratorio de suelos y pavimentos.

Según la figura 6, se muestra que la curva granulométrica ajustada según la combinación de los agregados que se encuentra centrado a los límites del huso MAC, por lo cual cumple con el requerimiento establecido.

c) Polímeros elastómero termoplástico sintético

Los polímeros elastómeros termoplásticos sintético son sustancias de alto peso molecular formado por la unión de cientos de miles de moléculas llamadas monómeros. Se forman así moléculas gigantes que toman formas diversas. (Maxil & Salinas, 2006). En la tabla 15 se tiene las principales características.

Tabla 16
Características técnicas de LG LUPRENE 501

Características técnicas	Norma	Unidad	Valores
Estireno	Metodo dexo	% en peso	29
Contenido Dibloque	Metodo dexo	% en peso	< 1
Indice de fluidez	ASTM D 1238	Dg/min	12
Viscosidad en solucion	ASTM D 2196	cps	400

Volátiles	Metodo dexo	% en peso	0.4
Ceniza	ASTM D 1416	% en peso	0.8
Resistencia a la traccion	ASTM D 412	PSI (MPa)	4800(33.1)
Modulo	ASTM D 412	PSI (MPa)	530(3.7)
Alargamiento a la rotura	ASTM D 412	%	1100
Dureza	ASTM D 2240	Shore A	65
Peso especifico	ASTM D792	-	0.94

Fuente: producto LG CHEM Valores típicos para SBS utilizado para modelo por inyección, compresión(espumado), extrusión de lámina y perfil.

Metodología de diseño de mezclas asfálticas convencionales para el Ensayo Marshall.

La metodología utilizada para el diseño de la mezcla asfáltica corresponde a lo indicado según la sección MTC E 504 - Resistencia de mezclas asfálticas empleando el equipo Marshall según lo dispuesto en el Manual de Ensayo de Materiales – 2016, con esta metodología se logran determinar los parámetros Marshall que permiten establecer el contenido óptimo de asfalto en la mezcla asfáltica.

Para establecer el valor del contenido óptimo de asfalto de las mezclas asfálticas convencionales se elaboran mezclas con cinco diferentes contenidos de asfalto, siendo estos porcentajes empleados de 4.0% 4.5%, 5.0%, 5.5% y 6.0%. Las cuantificaciones de los parámetros Marshall de cada contenido de cemento asfalto, se obtienen del promedio de los resultados de tres probetas fabricadas para cada uno de los porcentajes de cemento asfáltico, cuyos valores no difieran ligeramente entre ellas, cuyos resultados obtenidos de los ensayos se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17

Resultado de diseño Marshall de la mezcla asfáltica convencional.

Diseño Marshall de mezclas asfálticas (T° mezcla: 150 °C y T° compactación: 145 °C)						
Parámetro	Und.	Resultado obtenido				
Cemento asfáltico	%	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5
Peso unitario	gr/c.c.	2.364	2.384	2.399	2.415	2.405
Vacíos	%	5.7	4.5	4.0	2.9	1.9
Vacíos agregado mineral	%	17.5	17.3	17.2	17.1	17.9
Vacíos llenos C. A.	%	67.2	74.0	76.5	83.0	89.4
Flujo	mm	2.5	3.2	3.6	4.3	4.7
Estabilidad	Kg	990	1205	1242	1210	1125

Fuente: Resultados de diseño Marshall

Para establecer del contenido óptimo de asfalto en las mezclas asfálticas convencionales, se obtiene a partir del porcentaje de cemento asfáltico para el promedio de límites de vacíos (4%), con la cual, el contenido óptimo de asfalto es de 5.5%; una vez determinado el contenido óptimo de asfalto se evalúan los demás parámetros, los cuales deben cumplir el requerimiento del diseño especificado en el Manual EG - 2013, cuyo resultado se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18

Requerimiento y resultado del diseño Marshall del MAC convencional.

Parámetros de diseño de mezclas	Requerimiento EG - 2013	Diseño	Criterio de aceptación
Cemento asfáltico óptimo (%)	-	5.5	-
Granulometría	Huso ASTM D3515	ok	Cumple

Marshall MTC E504

1. Compactación: cantidad de golpes por lado	75	75	Cumple
2. Peso unitario (gr/cm ³)	-	2.399	-

3. Estabilidad mín. (kg.)	8.15kN/831kg	1242	Cumple
4. Flujo (0.01" / 0.25mm)	8-14/3-5	3.6	Cumple
5. Relación estabilidad - flujo (kg/cm)	1700 - 4000	3419	Cumple
6. Porcentaje de vacíos con aire (%)	3%-5%	4.0	Cumple
7. Vacíos en el agregado mineral (%)	14.5 min	17.2	Cumple
8. Relación polvo vs asfalto	0.6 - 1.3	1.1	Cumple

Fuente: Resultados del Diseño Marshall – Elaboración propia

Metodología de diseño de las mezclas asfálticas altamente modificada con polímero elastómero termoplástico sintético para el ensayo Marshall.

La metodología empleada para el diseño de las mezclas asfálticas altamente modificada con polímero elastómero termoplástico, es el mismo procedimiento establecido para la elaboración de probetas de mezclas asfálticas en caliente convencional para el ensayo Marshall. Se evalúa la influencia que produce el polímero elastómero termoplástico al adicionar en la elaboración de la mezcla asfáltica. La técnica empleada para la adición de polímero elastómero termoplástico se realiza por proceso de vía seca, para lo cual se emplea porcentajes mínimos de adición de polímero hasta el 8.0 % respecto al peso del asfalto. La adición se realiza en pequeñas cantidades del con polímero elastómero termoplástico y se incorporaron en porcentajes de 7.5 %, 8.0 % y 8.5 % con respecto al peso del asfalto.

Figura 13. Agregados y polímero



Figura 14. Proceso de calentamiento y mezclado



Procedimiento para la fabricación de probetas de mezcla asfáltica altamente modificada con polímero elastómero termoplástico sintético:

El procedimiento para la fabricación de probetas de mezclas asfálticas altamente modificada con polímero elastómero termoplástico en laboratorio, no tiene diferencia sustancial con el procedimiento utilizados para las mezclas asfálticas convencionales salvo en la cantidad de componentes. Seguidamente se describe el procedimiento de fabricación de la probeta Marshall:

1. Se establece el porcentaje de polímero elastómero termoplástico con relación al peso asfalto; así mismo, se establece la temperatura de fabricación de la mezcla en 150 °C.

2. Se combinan las fracciones de agregado grueso y fino de acuerdo a la combinación de agregados obtenidos para las mezclas asfálticas en caliente convencional. Así mismo, se determinó la cantidad polímero elastómero termoplástico, cemento asfáltico y el agregado a utilizar, con el fin de obtener el tamaño determinado de las probetas requeridas para cada uno de los ensayos.
3. Se procedió a calentar el agregado, asfalto y polímero en el horno hasta la temperatura de mezclado; la temperatura establecida para el proceso de mezclado es de 150 °C.
4. Concluida con el proceso de mezclado del agregado y polímero elastómero termoplástico, se adicionó el cemento asfáltico calentado a una temperatura de acuerdo a la carta de viscosidad del asfalto, se procede a realizar el mezclado de los componentes hasta conseguir una homogeneidad que cubra en su totalidad el agregado y el resto de componentes.
5. Se procede a colocar la mezcla asfáltica altamente modificada en los moldes tipo Marshall a una temperatura 150°C para realizar la compactación aplicándose 75 golpes con el martillo Marshall en ambos lados de la probeta.
6. Esta probeta se mantendrá en el molde de tipo Marshall por un tiempo 4 horas como mínimo o hasta que la mezcla asfáltica moldeada obtenga la temperatura ambiente; para luego retirarlas.

Determinación de contenido óptimo de asfalto y el porcentaje polímero elastómero termoplástico sintético:

Para determinar el contenido óptimo de asfalto y el porcentaje óptimo de polímero elastómero termoplástico para las mezclas asfálticas altamente modificadas se utiliza los parámetros Marshall en función a la sección **MTC E504 - Resistencia de Mezcla Asfáltica Empleando el Aparato Marshall** según el Manual de Ensayo de Materiales - 2013; para lo cual se fabrican probetas de acuerdo al procedimiento descrito en el ítem

anterior. Luego se procedió a realizar el diseño de la mezcla asfáltica en caliente altamente modificada según el siguiente detalle:

Diseño Marshall de la mezcla asfáltica altamente modificada con 7.5% de adición de polímero elastómero termoplástico sintético:

Para el diseño de la mezcla asfáltica altamente modificada con 8.0% de polímero elastómero termoplástico, se fabricaron probetas con contenidos distintos de cemento asfáltico, los mismos que son: 4.0%, 4.5%, 5.0%, 5.5% y 6.0%, empleándose una temperatura de mezclado de 150°C y temperatura de compactación es de 145°C; la aplicación de esfuerzos para la compactación es de 75 golpes mediante el martillo Marshall, aplicándose dichos golpes a cada cara de la probeta, cuyos resultados de los parámetros Marshall se muestran a continuación.

Tabla 19

Resultados del diseño Marshall de la mezcla asfáltica con 7.5 % de polímero elastómero termoplástico sintético.

Parámetro	Unidad	Resultado				
Cemento asfáltico	%	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
Peso unitario	gr/c.c.	2.361	2.38	2.414	2.431	2.438
Vacíos	%	8.5	7.1	5.3	3.6	2.5
Vacíos agregado mineral	%	16.1	19.70	18.70	18.89	19.63
Vacíos llenos C. A.	%	47.2	55.3	64.9	76.0	83.6
Flujo	mm	2.75	3.0	3.5	3.50	3.75
Estabilidad	Kg	1559	1723	1836	1811	1615
Factor rigidez	Kg/cm	5669	5743	5246	5174	4307

Fuente: Resultados diseño Marshall con 7.5% de polímero elastómero termoplástico.

De los resultados obtenidos del diseño Marshall de la mezcla asfáltica modificada con la incorporación de fibras de polipropileno se ha graficado los valores de peso

unitario, % vacíos, % VMA, vacíos llenados C.A., flujo, estabilidad y el Índice de Rigidez.

Así mismo la determinación de contenido óptimo de cemento asfáltico para la mezcla en caliente modificada para el promedio de los límites de vacíos (4.10%), con la cual se obtiene el contenido de asfalto que es de 5.5%; para luego ser evaluados los otros parámetros, los mismos que deben cumplir con los requisitos del diseño especificadas según el manual EG 2013, a excepción del parámetro de Índice de Rigidez que se encuentra fuera del requerimiento establecido; los resultados logrados se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 20

Resultado del diseño Marshall con C.A. óptimo con 7.5% polímero elastómero termoplástico sintético.

Parámetros de diseño	MAC-2	Resultado	Unidad	Condición
Óptimo Contenido C.A	+/- 0.2	5.5	(%)	Cumple
Peso Unitario	-	2.431	(gr/cm ³)	Cumple
Vacíos al Aire	3 - 5	3.6	(%)	Cumple
V.M.A	Min. 14	18.89	(%)	Cumple
Vacíos Llenados C.A	-	76.0	(%)	Cumple
Flujo	2 - 4	3.50	(mm)	Cumple
Estabilidad	Min. 830	1811	(Kg)	Cumple
Índice de rigidez	1700 - 4000	5174	(kg/cm)	No Cumple

Fuente: Diseño Marshall con 7.5 % de polímero elastómero termoplástico sintético.

Diseño Marshall de la mezcla asfáltica en caliente con 8.0% de polímero elastómero termoplástico sintético:

Para el diseño de las mezclas asfálticas en caliente modificada con 8.0% de polímero elastómero termoplástico sintético, se fabricaron probetas con distintos cantidades de contenido de cemento asfáltico, los mismos que son de 4.0%, 4.5%, 5.0%,

5.5% y 6.0%, empleándose temperaturas de mezclado de 150°C y temperatura de para compactación es de 145°C; la aplicación de esfuerzos para la compactación es de 75 golpes empleando el martillo Marshall por cada cara de las probetas, cuyos resultados de los parámetros Marshall se muestran a continuación.

Tabla 21

Resultados del diseño Marshall de la mezcla asfáltica con 8.0 % de polímero elastómero termoplástico sintético.

Parámetro	Unidad	Resultado				
Cemento asfáltico	%	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
Peso unitario	gr/c.c.	2.356	2.384	2.410	2.425	2.440
Vacíos	%	8.7	7.0	5.5	3.8	2.4
Vacíos agregado mineral	%	16.3	15.7	15.3	15.2	15.1
Vacíos llenos C. A.	%	46.6	55.4	64.1	75.0	84.1
Flujo	mm	2.75	3.25	3.25	3.75	3.75
Estabilidad	Kg	1582	1717	1830	1787	1600
Factor rigidez	Kg/cm	5753	5283	5631	4765	4267

Fuente: Resultados diseño Marshall con 8.0 % de polímero elastómero termoplástico.

Así mismo la determinación de contenido óptimo de cemento asfáltico en las mezclas asfálticas en caliente modificadas se toma el promedio del límite de vacíos (4.30%), con la cual se obtiene el contenido óptimo de asfalto de 5.5%; para luego ser evaluados los otros parámetros, los mismos que deben cumplir con el requerimiento del diseño especificada según el manual EG 2013, a excepción del parámetro de Índice de Rigidez que se encuentra fuera del requerimiento establecido; los resultados se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 22

Resultado del diseño Marshall con C.A. optimo con 8.0 % de polímero elastómero termoplástico sintético.

Parámetros de diseño	MAC-2	Resultado	Unidad	Condición
Optimo Contenido C.A	+/- 0.2	5.5	(%)	Cumple
Peso Unitario	-	2.425	(gr/cm ³)	Cumple
Vacíos al Aire	3 - 5	3.8	(%)	Cumple
V.M.A	Min. 14	15.2	(%)	Cumple
Vacíos Llenados C.A	-	75.0	(%)	Cumple
Flujo	2 - 4	3.75	(mm)	Cumple
Estabilidad	Min. 830	1787	(Kg)	Cumple
Índice de rigidez	1700 - 4000	4765	(kg/cm)	No Cumple

Fuente: Diseño Marshall con 8.0 % de polímero elastómero termoplástico.

Diseño Marshall de la mezcla asfáltica en caliente con 8.5% porcentaje polímero elastómero termoplástico sintético:

Para el diseño de las mezclas asfálticas en caliente modificadas con 0.60% de adición de fibras de polipropileno, se fabricaron probetas con distintos cantidades de contenido de cemento asfálticos, los mismos que fue de 4.0%, 4.5%, 5.0%, 5.5% y 6.0%, empleándose una temperatura de mezclado de 150°C y una temperatura de compactación de 145°C; la aplicación de esfuerzos para la compactación es de 75 golpes del martillo Marshall por cada cara de las probetas, cuyos resultados de los parámetros Marshall se muestran a continuación.

Tabla 23

Resultado de diseño Marshall con 8.5 % de polímero elastómero termoplástico sintético.

Parámetro	Unidad	Resultado				
		4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
Cemento asfáltico	%	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
Peso unitario	gr/c.c.	2.349	2.389	2.414	2.427	2.446
Vacíos	%	9.0	6.8	5.3	3.87	2.2
Vacíos agregado mineral	%	16.5	15.6	15.1	15.1	14.9
Vacíos llenos C. A.	%	45.5	56.4	64.9	75.5	85.2
Flujo	mm	3.0	3.0	3.5	3.75	4.0
Estabilidad	Kg	1593	1726	1847	1814	1630
Factor rigidez	Kg/cm	5310	5753	5277	4837	4075

Fuente: Diseño Marshall con 8.5 % de polímero elastómero termoplástico.

De los resultados obtenidos del diseño Marshall de las mezclas asfálticas modificadas con la adición de fibra de polipropileno se ha graficado los valores de peso unitario, % vacíos, % VMA, vacíos llenados C.A., Flujo, Estabilidad y el Índice de Rigidez.

Así mismo la determinación de contenido óptimo de cemento asfáltico en las mezclas asfálticas en caliente modificadas se toma el promedio del límite de vacíos de 4.30%, con este se determina el contenido óptimo del asfalto que es de 5.5%; para luego ser evaluados los otros parámetros, mismos que deben cumplir con lo requerido para el diseño de mezcla asfáltica especificada en el manual EG -2013, a excepción del parámetro de Índice de Rigidez que se encuentra fuera del requerimiento establecido; los resultados obtenidos se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 24 Resultado del diseño Marshall con asfalto optimo con 8.5 % de polímero elastómero termoplástico sintético.

Parámetros de diseño	MAC-2	Resultado	Unidad	Condición
Optimo Contenido C.A	+/- 0.2	5.5	(%)	Cumple
Peso Unitario	-	2.427	(gr/cm ³)	Cumple
Vacíos al Aire	3 - 5	3.87	(%)	Cumple
V.M.A	Min. 14	15.1	(%)	Cumple
Vacíos Llenados C.A	-	75.5	(%)	Cumple
Flujo	2 - 4	3.75	(mm)	Cumple
Estabilidad	Min. 830	1814	(Kg)	Cumple
Índice de rigidez	1700 - 4000	4837	(kg/cm)	No Cumple

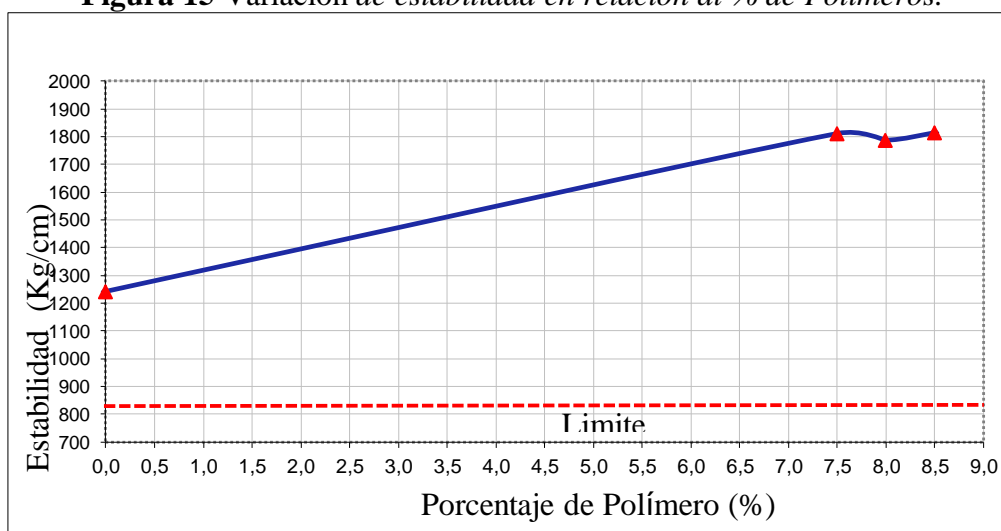
Fuente: Diseño Marshall con 8.5 % de polímero elastómero termoplástico – Elaboración propia

Resultados del diseño mezclas asfálticas mediante el ensayo Marshall.

El resultado obtenido después del ensayo Marshall de la mezcla asfáltica convencional y altamente modificada con polímero elastómero termoplástico sintético, se analizará estabilidad, flujo y el índice de rigidez; que se muestran a continuación:

Estabilidad

Figura 15 Variación de estabilidad en relación al % de Polímeros.

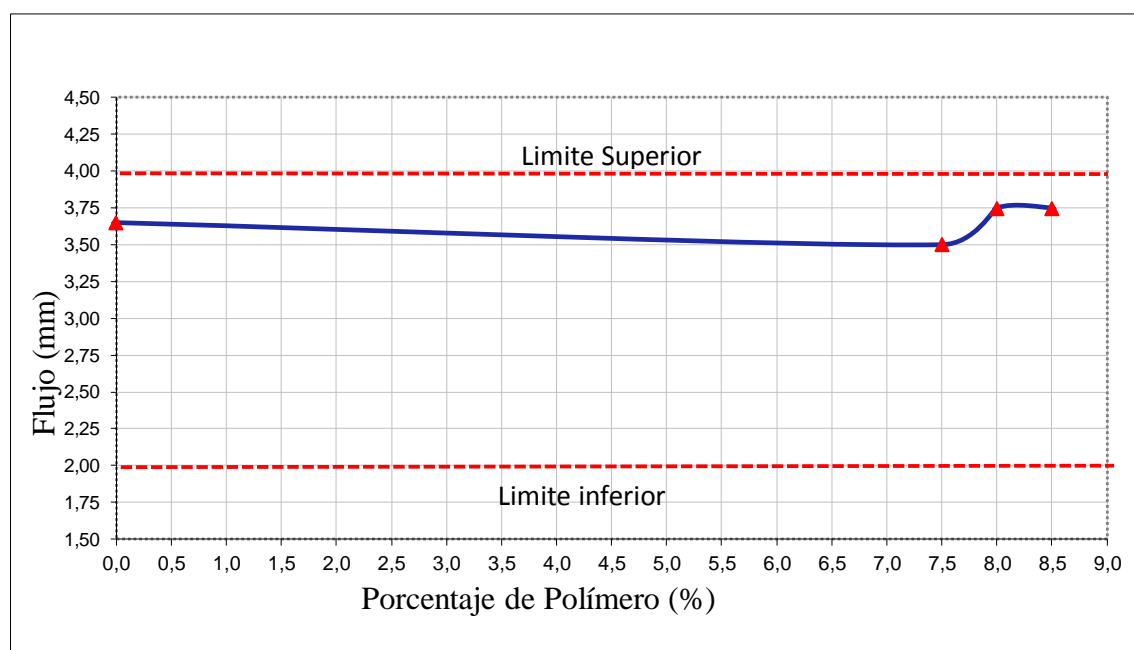


Fuente: Elaboración propia.

En la figura 15, la estabilidad de las mezclas asfálticas altamente modificadas muestra un incremento positivo y muy superior al límite mínimo recomendado por la metodología de evaluación del ensayo Marshall.

Flujo

Figura 16 Variación del flujo en relación al % de Polímero.



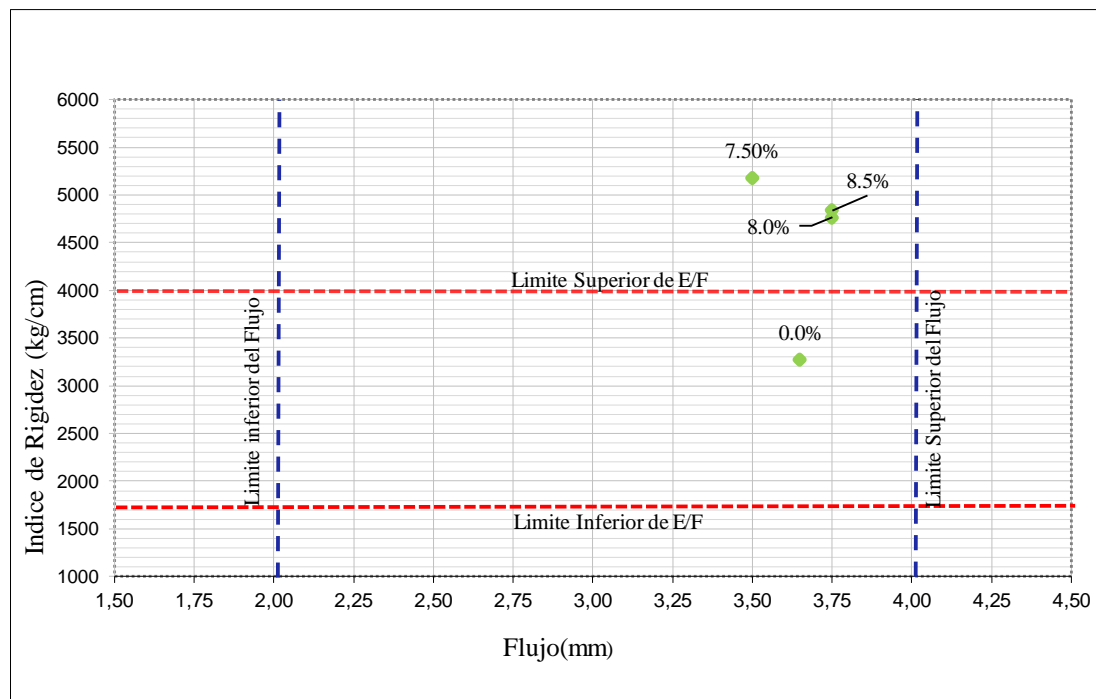
Fuente: Elaboración propia

Según la figura 16, correspondiente a la variación del flujo de las mezclas Asfálticas altamente modificada, se observa que con cualquier porcentaje de polímero se mantiene en el rango según los parámetros exigidos en la normativa para el diseño Marshall por el Instituto del Asfalto (1982).

Índice de rigidez de las mezclas asfálticas.

Figura 17

Variación del índice de rigidez de las mezclas asfálticas.



Fuente: Elaboración propia

Según la figura 17, se observa que la mezcla asfáltica altamente modificada con polímeros elastómero termoplástico sintético a 7.5%, 8.0% y 8.5% no son tan dúctiles para la deformación, sin embargo, puede ser más frágil o puede presentar fisuraciones tempranas por su alta rigidez.

5.1.3 Resultado del Módulo de Resiliente de la mezcla asfáltica altamente modificada con polímeros elastómero termoplástico sintético.

Fecha y hora de inicio	:	022/08/20201
Pulsos de acondicionamiento	:	5
Temperatura del núcleo	:	20.5 (°C)
Temperatura de la superficie	:	19.6 (°C)

Tabla 25

Módulo resiliente de la mezcla asfáltica altamente modificada con 7.5% de polímero elastómero termoplástico sintético – espécimen 1

Resultados del ensayo	Pulso 1	Pulso 2	Pulso 3	Pulso 4	Pulso 5	Media	Desv. Stand.	% CV
Módulo resiliente (mpa)	4271	4290	4225	4233	4146	4233	49.72	1.17
Fuerza de carga pico (n)	3149	3165	3143	3138	3139	3147	9.95	0.32
Fuerza de asentamiento	346	342	347	356	360	350	6.57	1.88
Deformación total recuperable	7.58	7.59	7.65	7.62	7.79	7.65	0.08	0.98
Deformación horizontal recuperable #1 (µm)	3.47	3.49	3.48	3.51	3.58	3.51	0.04	1.12
Deformación horizontal recuperable #2 (µm)	4.11	4.40	4.17	4.11	4.21	3.14	0.04	1.02

Fecha y hora de inicio	:	022/08/20201
Pulsos de acondicionamiento	:	5
Temperatura del núcleo	:	20.5 (°C)
Temperatura de la superficie	:	19.6 (°C)

Tabla 26

Módulo Resiliente de la mezcla asfáltica altamente modificada con 8.0% de polímero elastómero termoplástico sintético – espécimen 1

Resultados del ensayo	Pulso 1	Pulso 2	Pulso 3	Pulso 4	Pulso 5	Media	Desv. Stand.	% CV
Módulo resiliente (mpa)	4803	4784	4764	4732	4669	4750	47.13	0.99
Fuerza de carga pico (n)	3158	3151	3149	3148	3142	3150	5.29	0.17
Fuerza de asentamiento	349	348	350	353	354	351	2.23	.64
Deformación total recuperable	6.76	6.77	6.79	6.38	6.91	6.81	0.06	0.85
Deformación horizontal recuperable #1 (µm)	3.61	3.62	3.65	3.68	3.71	3.65	0.04	1.01
Deformación horizontal recuperable #2 (µm)	3.14	3.15	3.14	3.15	3.21	3.16	0.03	0.80

Fecha y hora de inicio	:	022/08/20201
Pulsos de acondicionamiento	:	5
Temperatura del núcleo	:	20.5 (°C)
Temperatura de la superficie	:	19.6 (°C)

Tabla 27

Módulo resiliente de la mezcla asfáltica altamente modificada con 8.5% de polímero elastómero termoplástico sintético – espécimen 1

Resultados del ensayo	Pulso 1	Pulso 2	Pulso 3	Pulso 4	Pulso 5	Media	Desv. Stand.	% cv
Módulo resiliente (mpa)	6179	5872	5878	5838	5687	5891	159.82	2.71
Fuerza de carga pico (n)	3150	3166	3144	3139	3140	3149	9.95	0.32
Fuerza de asentamiento	346	342	347	356	360	350	6.57	1.88
Deformación total recuperable	5.58	5.59	5.65	5.62	5.79	5.65	0.08	0.98
Deformación horizontal recuperable #1 (µm)	2.47	2.49	2.48	2.51	2.58	2.51	0.04	1.12
Deformación horizontal recuperable #2 (µm)	3.11	3.40	3.17	3.11	3.21	3.14	0.04	1.02

Se realizaron tres muestras de módulo resiliente de la mezcla asfáltica altamente modificada con porcentajes de 7.5% ,8.0%,8.5% de polímero elastómero termoplástico sintético. El módulo de resiliente es evaluado mediante la norma AASHTO TP-31, a temperatura de 20°C (metodología AASHTO 1993), previo a un envejecimiento de acuerdo a la norma de ensayos AASHTO R-30. No existe un valor a establecer para el módulo resiliente, ya que este parámetro es usado para el diseño de pavimentos. Por tal motivo su aceptación dependerá de los requerimientos definidos en un diseño pre establecido.

De acuerdo a las tabla 25,26 y 27 , la mezcla asfáltica altamente modificada con polímero elastómero sintético fue sometida a un ensayo de módulo de resiliente teniendo como resultado de 4233 Mpa ,4750 Mpa, y 5891 Mpa con fuerzas de carga de 3150N,3147 y 3149 unas deformación total recuperable de 7.65, 6.81y 5.67 μm , es un resultado favorable superando a los requisitos mínimos de módulo resiliente de 2965 Mpa a una temperatura de 20°C, que muestra el manual de AASHTO 93 y el manual de Suelos, Geología, Geotecnia y pavimento del Ministerio de Transporte y comunicaciones.

5.1.3 Resultado de la resistencia al ahuellamiento permanente de las mezclas asfálticas mediante el ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo.

El ensayo de la Rueda Cargada es una simulación a escala reducida de las condiciones de campo para investigar la resistencia al ahuellamiento y la sensibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas en caliente, las misma que se realiza de acuerdo a lo

establecida según la norma AASHTO T-324 Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA). El ensayo a realizar para la mezcla asfáltica convencional se ha utilizado probeta cilíndrica compactada en laboratorio mediante el compactador giratorio, la probeta fabricada es de 150 mm de diámetro y 60 mm de altura, los materiales empleados fueron de grava chancada (38%) y arena chancada (62%), cuyo contenido de vacíos es de 7.1% y el contenido de asfalto de 5.5% (PEN 60/70), con densidad máxima teórica de 2496 kg/cm³. Se ha acomodado los especímenes cilíndricos bajo agua a una temperatura de 50.4°C en el dispositivo de la Rueda Cargada, aplicándose a la carga repetida de ida y vuelta de la rueda de acero de 705N (72 kg), con una velocidad promedio de la rueda de 52 pasadas por minuto. Así mismo para el ensayo de la Rueda Cargada para las mezclas asfálticas altamente modificadas con 7.5%, 8.0% y 8.5% de polímeros elastómero termoplástico sintético (LG-501), también se ha utilizado especímenes cilíndricos compactados en laboratorio mediante el compactador giratorio de 150 mm de diámetro y 60 mm de altura, los materiales empleados fue de grava chancada (38%) y arena chancada (62%), cuyo contenido de vacíos es de 7.5% y el contenido de asfalto de 5.5% (PEN 60/70), con densidad máxima teórica de 2,510 kg/cm³. Se ha acomodado los especímenes cilíndricos bajo agua a una temperatura de 50.5°C en el dispositivo de la Rueda Cargada, aplicándose a la carga repetida con la rueda de acero de 705N (72 kg), con una velocidad promedio de la rueda de 52 pasadas por minuto. minuto.

Tabla 28. Daño por humedad de la mezcla asfáltica altamente modificada con polímero elastómero termoplástico sintético

	Condicion Seca			Condicion Húmeda		
Muestra	1	2	3	4	5	6
Diametro (pulg)	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
Altura (pulg)	2.42	2.42	2.42	2.41	2.42	2.42
W.Aire (g)	1099.1	1098.4	1099.5	1098.6	1097.7	1099.2
W.SSS (g)	1104.6	1103.9	1103.9	1103.5	1102.2	1104.4
W.Agua (g)	636.8	635.3	635.7	636.9	635.0	641.1
Volumen (cm3)	467.8	468.6	468.2	466.6	467.2	468.5
Densidad (g/cm3)	2.350	2.344	2.348	2.354	2.350	2.346
% Vacios	7.1	7.3	7.2	6.9	7.1	7.2
Condicion de Saturacion						
Peso Sat. (g)				1123.8	1123.2	1125.6
% Satur.				78.0	77.1	77.9
Fase de congelamiento a -18°C por 16 h. seguido de 24 h en agua a 60°C+ 1 h a 25°C						
W.Aire (g)				1098.6	1097.7	1099.2
W.SSS (g)				1126.1	1126.5	1128.9
W.Agua (g)				656.5	656.2	658.0
Volumen (cm3)	Acondicionamiento de especímenes a 1 hora a 25° C			469.6	470.3	470.9
Densidad (g/cm3)				2.339	2.334	2.334
% Vacios				7.5	7.7	7.7
Altura (pulg)	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42	2.43
Resistencia a la tracción indirecta Seco (STD)	2456	2446	2494	2218	2256	2199
Humedo (STM)	161.20	160.6	163.7	145.6	148.1	144.3
No Condicionada (N)				Condicionada (N)		
161.9				146.0		
TSR				90.2 %		

Fuente: resultado laboratorio .

Tabla 29*Requisito de Adherencia*

Ensayo	Norma	Requerimiento	
		< 3000	> 3000
Resistencia conservada en la prueba de tracción indirecta	AASHTO T 283	80 min	

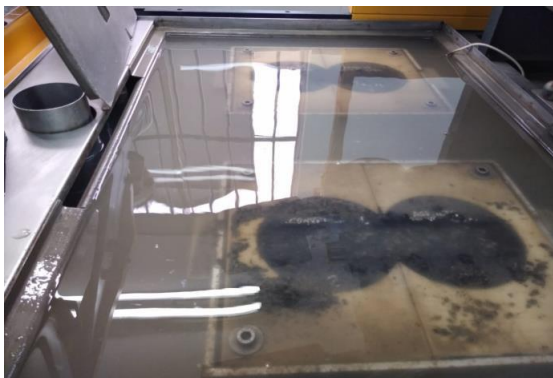
Fuente: MTC, Especificaciones Técnicas Generales para Construcción, 2013.

En la tabla 28, nos muestra los resultados del ensayo de Lottman modificado a la mezcla asfáltica altamente modificada con polímero elastómero termoplástico sintético, en condición seca y húmeda, teniendo una resistencia a 161.9 N en condición seca y de 146.0 N en condición húmeda, obteniendo una resistencia a la tracción indirecta (TSR) de 90.2% y comparando con los requisitos de adherencia de la tabla 30, cumple con los requisitos mínimos de la norma.

Figura 18.

Núcleos de especímenes de la mezcla asfáltica modificada con 8.0% de polímero elastómero termoplástico sintético – Después de la prueba de Rueda Cargada.

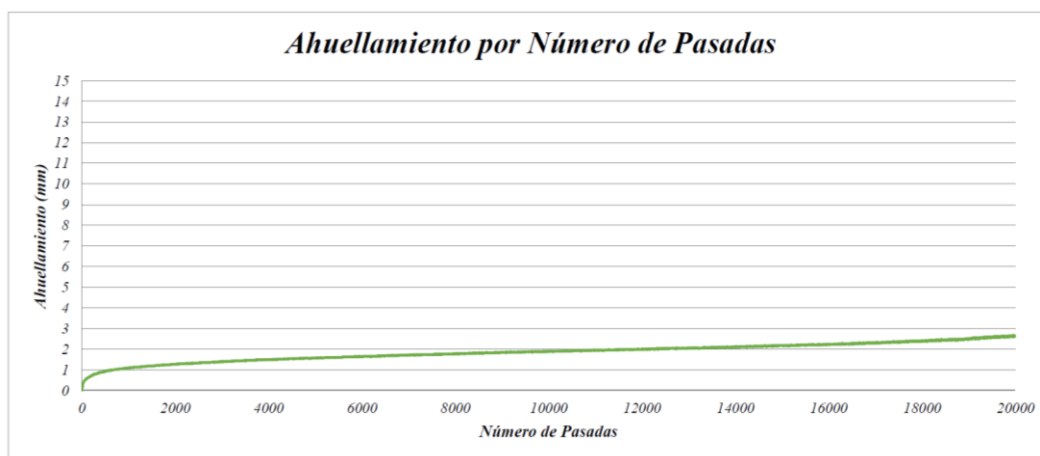




Fuente: Reporte del ensayo de Rueda Cargada

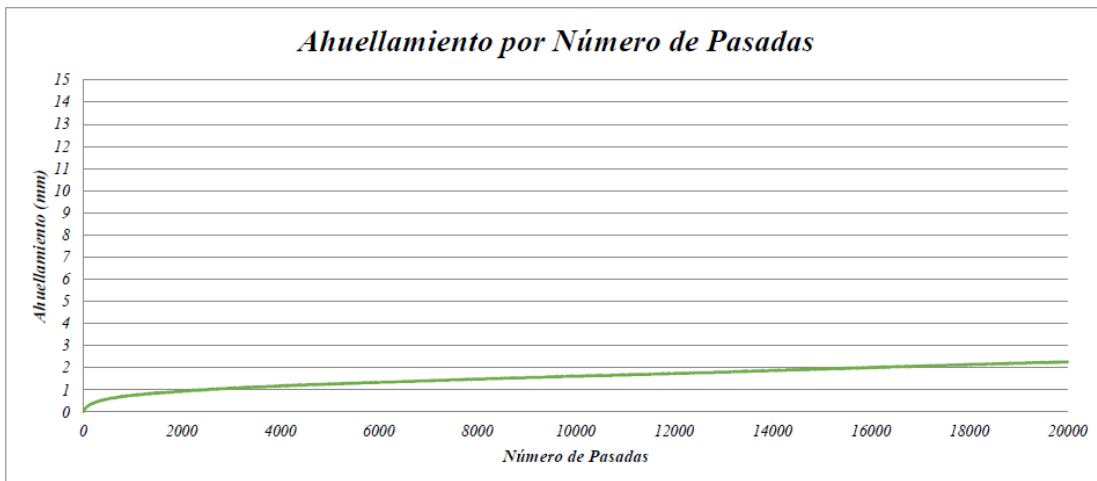
Concluida la prueba de la Rueda Cargada de la mezcla asfáltica en caliente convencional y altamente modificada con 7.5%,8.0%,8.5% de polímero SBS (LG 501), se ha obtenido los resultados que se muestran:

Figura 19 Núcleo de espécimen altamente modificada con 7.5% de polímero elastómero termoplástico sintético – Después de la prueba de Rueda Cargada.



Fuente: Reporte del ensayo de Rueda Cargada

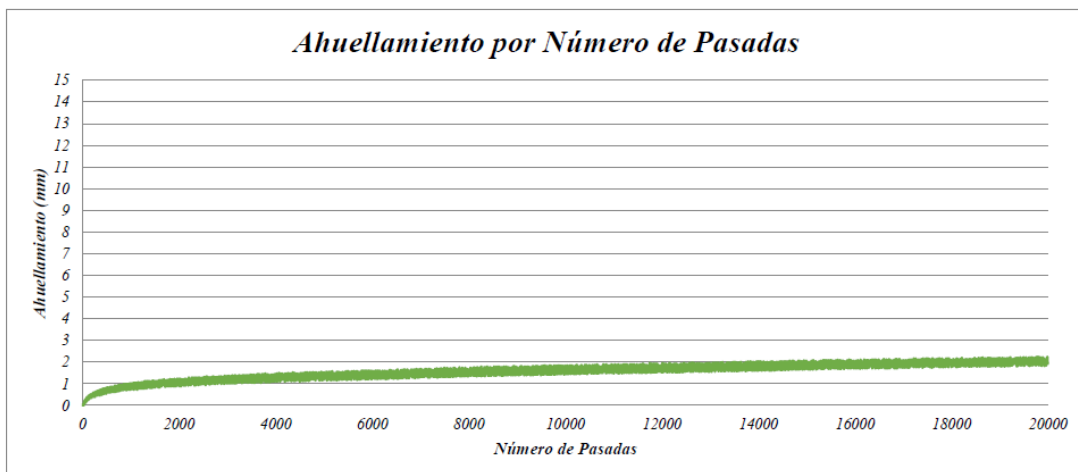
Figura 20
Núcleo de espécimen altamente modificada con 8.0% de polímero elastómero termoplástico sintético – Después de la prueba de Rueda Cargada.



Fuente: Reporte del ensayo de Rueda Cargada

Figura 21

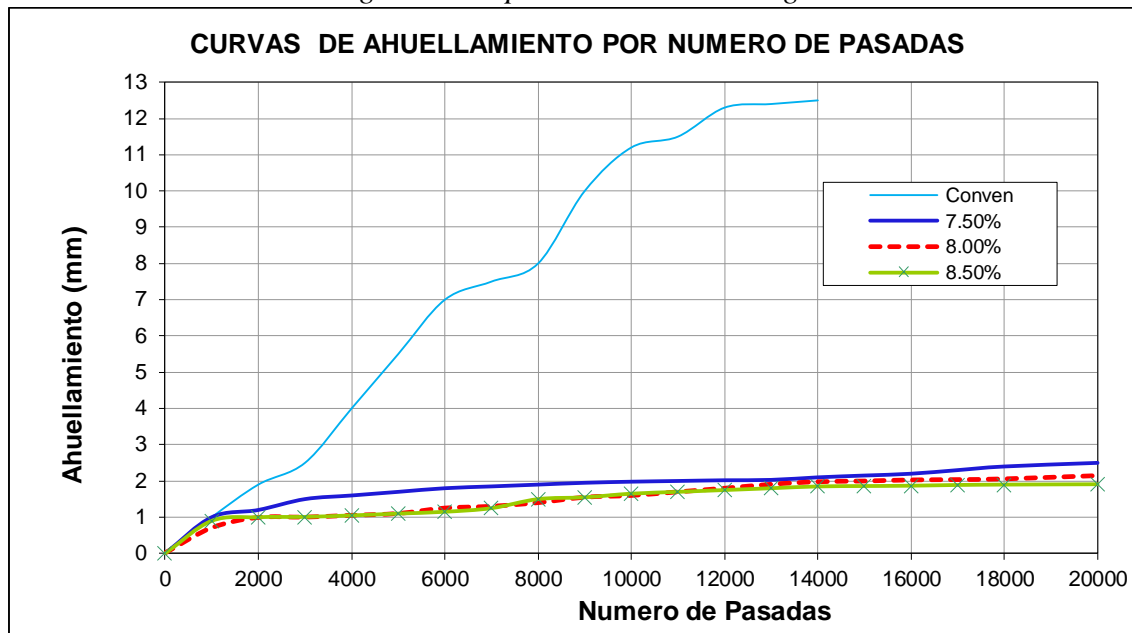
Núcleo de espécimen altamente modificada con 8.5% de polímero elastómero termoplástico sintético – Después de la prueba de Rueda Cargada.



Fuente: Reporte del ensayo de Rueda Cargada

Figura 22

Curvas de variación de desgaste de la prueba de Rueda Cargada



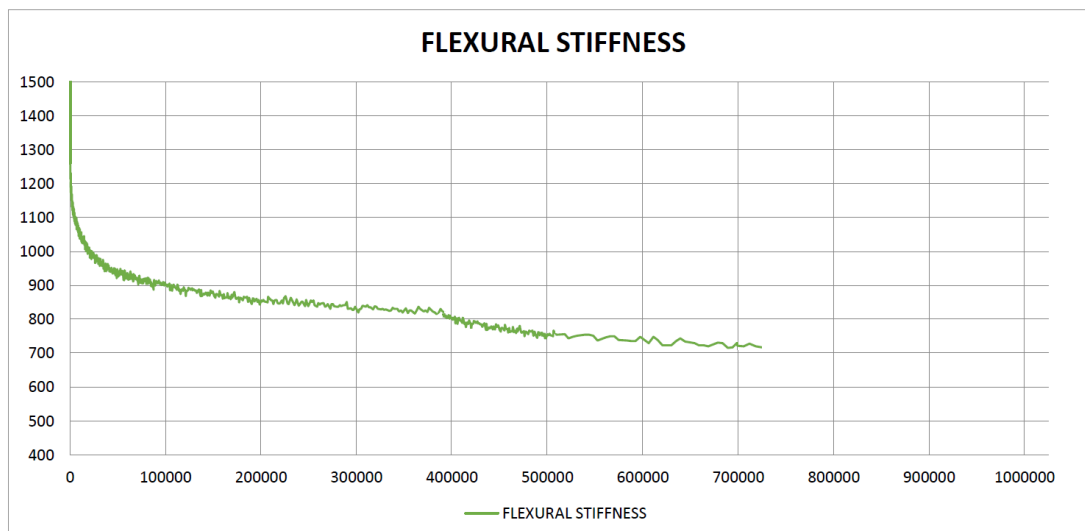
Fuente: Reporte del ensayo de Rueda Cargada .

Según la figura 22, se observa que la mezcla asfáltica altamente modificada con 7.5%, 8.0% y 8.5% de polímero elastómero termoplástico sintético tiene una mejora significativamente la resistencia al ahuellamiento, mayor cohesión y menor daño inducido por la humedad.

5.1.4 Resultado de la resistencia a la Fatiga de mezclas asfálticas altamente modificada mediante ensayo de Flexión de Viga en Cuatro Puntos.

Figura 23

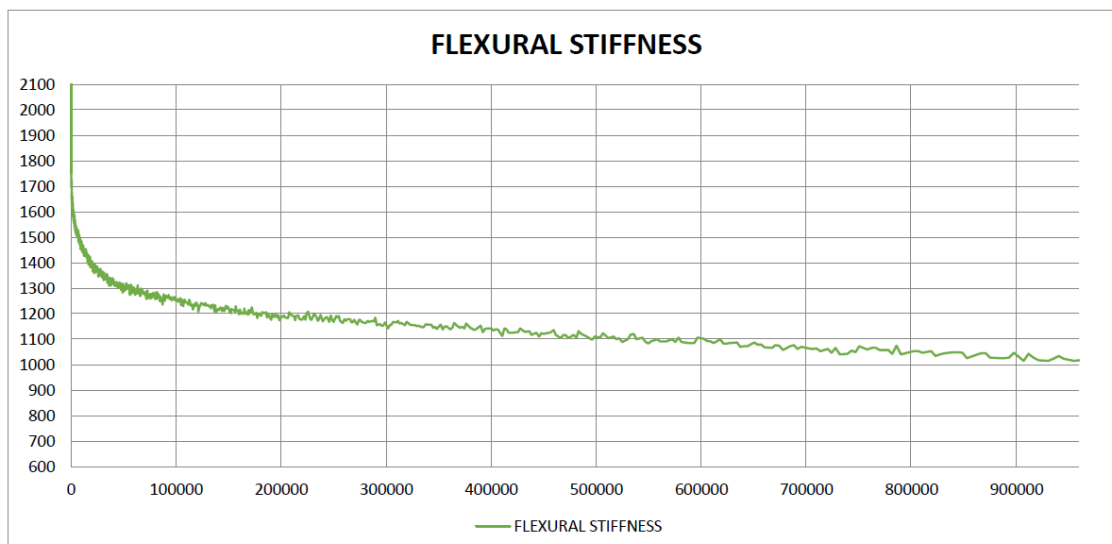
Núcleo de espécimen de la mezcla asfáltica convencional después de la prueba de Flexión de Viga en Cuatro Puntos.



Fuente: Reporte del ensayo de Flexión de Viga en Cuatro Puntos.

Figura 24

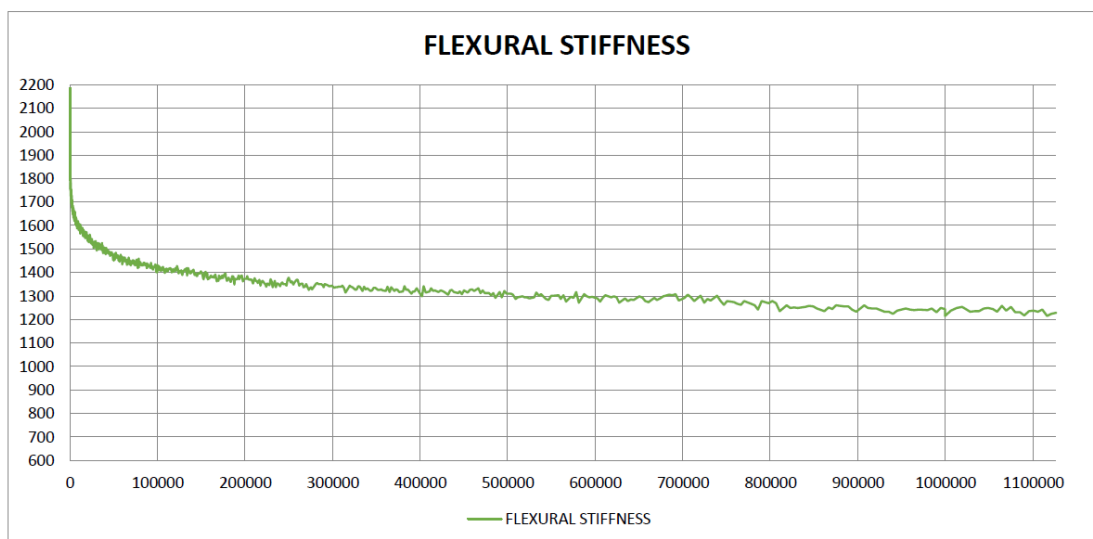
Núcleo de espécimen de mezcla asfáltica altamente modificada con 7.5% de polímero elastómero termoplástico sintético – después de la prueba de Flexión de Viga en Cuatro Puntos.



Fuente: Reporte del ensayo de Flexión de Viga en Cuatro Puntos.

Figura 25

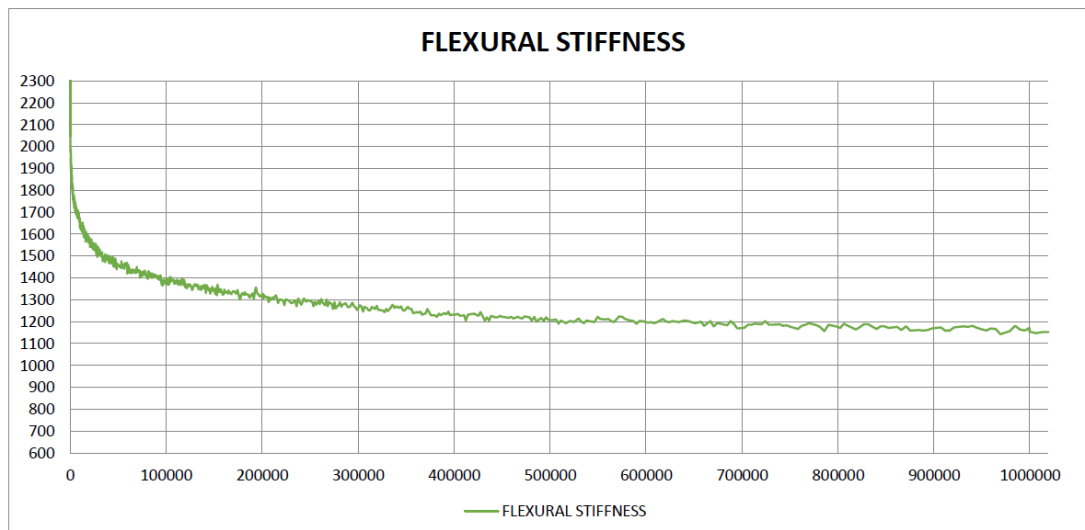
Núcleo de espécimen de mezcla asfáltica altamente modificada con 8.0 % de polímero elastómero termoplástico sintético – después de la prueba de Flexión de Viga en Cuatro Puntos.



Fuente: Reporte del ensayo de Flexión de Viga en Cuatro Puntos .

Figura 26

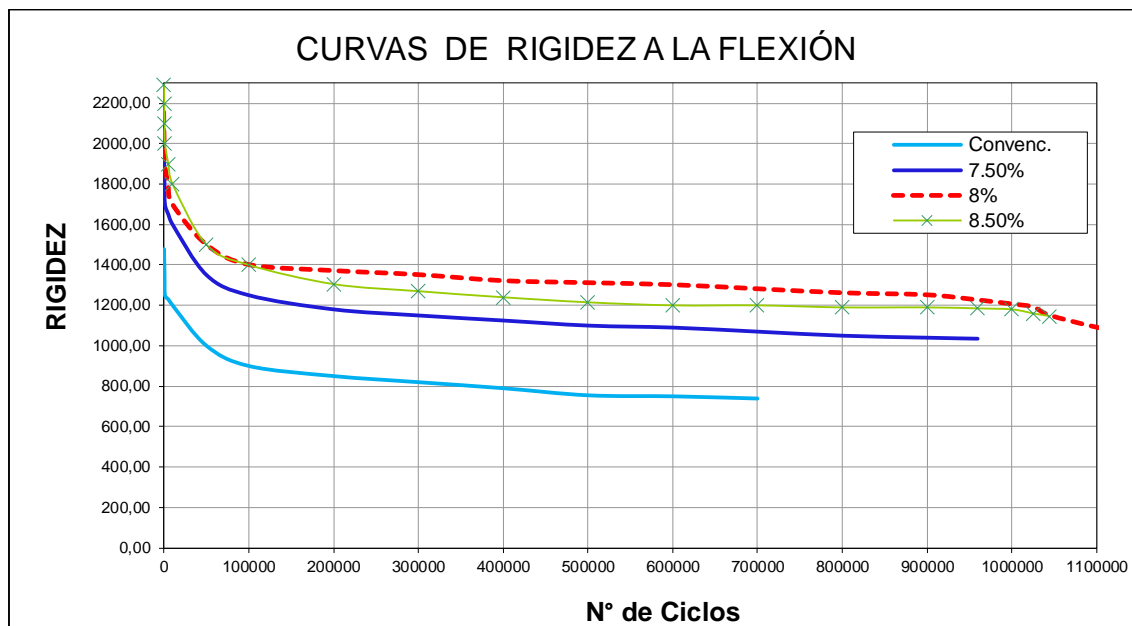
Núcleo de espécimen de mezcla asfáltica altamente modificada con 8.5 % de polímero elastómero termoplástico sintético – Después de la prueba de Flexión de Viga en Cuatro Puntos.



Fuente: Reporte del ensayo de Flexión de Viga en Cuatro Puntos.

Figura 27

Curvas de variación de la resistencia a la fatiga en la prueba de Flexión de Viga en Cuatro Puntos.



Fuente: Reporte del ensayo de Flexión de Viga en Cuatro Puntos.

Según la figura 27, se observa que la mezcla asfáltica altamente modificada con 7.5%, 8.0% y 8.5% de polímero elastómero termoplástico sintético tiene una mejora significativamente de la resistencia a la fatiga comparado con la de una mezcla asfáltica convencional. Específicamente para un porcentaje de 8.0% la resistencia a la flexión mejora significativamente respecto a las demás mezclas asfálticas. Por qué llega a perder el 50% de su rigidez en mayor cantidad de ciclos

Finalmente de los resultados obtenidos de los ensayos Marshall, modulo resiliente, Rueda Cargada y Flexión de Viga en Cuatro Puntos, se determina que las mezclas asfálticas en caliente altamente modificadas con la adición de polímero elastómero termoplástico sintético en porcentajes mayores al 7.5% del peso del asfalto presentan mejoras significativas en su comportamiento mecánico.

5.2 Análisis de resultados (discusión de resultados)

5.2.1. *Análisis de resultado Marshall; parámetros Estabilidad y Flujo*

La Estabilidad del diseño de mezcla asfáltica convencional es de 1242 kg, mientras que de la mezcla modificada con adición de 8.5% de polímero es de 1814 kg; lo que demuestra que la Estabilidad de la mezcla altamente modificada con elastómero termoplástico sintético es superior a la mezcla convencional en 572 kg la misma que equivale a 31.53%.

El Flujo del diseño de mezcla asfáltica convencional es de 3.65 (0.01”), mientras que de la mezcla modificada altamente modificada con 8.5% de polímero elastómero termoplástico sintético es de 3.75 (0.01”); lo que demuestra que el flujo de la mezcla altamente modificada con polímero es mayor a la mezcla convencional en 0.1 (0.01”), la misma que equivale a 2.67%.

Según Reyes, O. (2005), ha determinado los parámetros Marshall que es la Estabilidad presenta un incremento 26% con la adición de 0.6% de fibras polipropileno; mientras que el parámetro del Flujo presenta una reducción 3% con la adición de 0.45% de fibras. Los resultados mostrados de ambas investigaciones no tienen coincidencias en sus valores obtenidos, esto puede explicarse las diferencias que existiría en la calidad de los agregados empleados; sin embargo, podemos determinar que la adición de fibras en la mezcla asfáltica si incrementan en la resistencia a la deformación.

5.2.2. Análisis de resultados de deformación y flexión elástica.

Tabla 30

Resumen de resultado de elasticidad - ensayo módulo resiliente

Mezcla Asfáltica	Ensayo	Módulo resiliente (Mpa)	Fuerza de Carga (N)	Deformación total recuperable (μm)
Altamente modificado con 8.0% de polímero elastómero termoplástico sintético	Promedio	4750	3150	6.81
	Desv. Stand	36	5.29	0.06
	CV%	0.99	0.17	0.87
Convencional	promedio	6244	3195	3.44
	Desv. Stand	132.42	43.13	0.11
	CV%	2.12	2.93	4.53

Fuente: Elaboración propia

Analizando ambas mezclas de la tabla 30, la mezcla asfáltica altamente modificado resulta ser inferior en un 23.9% de módulo resiliente, en 1.20% de fuerza de carga y produce una mayor deformación recuperable en un 49.5% respecto a la mezcla asfáltica convencional.

Corbacho, (2019) afirma que “las muestras con mezcla modificada con fibras PET presentaron resultados de módulo resiliente promedio a 20°C de 2079 MPa y módulo resiliente promedio a 25°C de 1377 MPa. Resultados que son 37% más bajos en comparación a la mezcla asfáltica convencional analizada”.

5.2.3. *Análisis de resultados de la deformación permanente*

Tabla 31

Resultado del ensayo de rueda cargada de Hamburgo

Mezcla asfáltica	No. Pasadas	Profundidad de huella (mm)
Convencional	14010	12.5
7.5 % Polímero SBS	20000	2.64
8.0% Polímero SBS	20000	2.27
8.5% Polímero SBS	20000	1.93

Fuente: Resultados del informe de la prueba de Rueda de Hamburgo

Analizando ambas mezclas de la tabla 31, Para la mezcla asfáltica altamente modificadas con porcentajes de 7.5%,8.0% y 8.5% de polímero elastómero termoplástico sintético. Que fueron sumergidas en agua y bajo una temperatura de 50°C ensayando en situaciones a la que va estar expuesta, resulta una deformación de 2.64,2.27 y1.93 mm respectivamente superando ampliamente los requisitos de la Norma AASHTO T-324 por lo que se puede afirmar que las mezclas asfálticas altamente modificadas son 78.88%,81.84 y 84.56% más resistente a la deformación permanente respecto de una mezcla asfáltica convencional para un 30% mayor de numero de pasadas.

Según Peña, (2019) afirme que “para incorporaciones del 0.75% de cenizas volantes a la llenante mineral, esta alcanzo una profundidad de 12.5mm en 19,600 pasadas”. El investigador añadió un 75% de cenizas volantes a su mezcla asfáltica con diseño Marshall y no llego a cumplir con los requisitos mínimos que pide el AASHTO T-324.

5.2.4. Análisis de resultados de la resistencia a la fatiga

Tabla 32

Condición de término del Ensayo Flexión de viga en 4 puntos

Mezcla asfáltica	No. Ciclos	Deflexión viga (mm)	Rigidez Inicial	Rigidez final (Mpa)
MAC convencional	700134	0.3253	1478	739
MAC 7.5 % Polímero SBS	959648	0.3246	2069	1035
MAC 8.0% Polímero SBS	1126449	0.3253	2154	1077
MAC 8.5% Polímero SBS	1044278	0.2140	2293	1147

Fuente: Resultados del informe de la prueba de Flexión de Viga en Cuatro Puntos.

Analizando ambas mezclas de la tabla 32 y la figura 27, resulta que la mezcla asfáltica altamente modificada con 8% de polímero elastómero termoplástico sintético resulta superior en un 31.38% de Rigidez, sometidos a un número de ciclos superior en 8.93 %, respecto a la mezcla asfáltica convencional.

Para la mezcla asfáltica altamente modificada con polímero elastómero termoplástico sintético de 8.0% la resistencia a la flexión mejora significativamente respecto a las demás mezclas asfálticas, llegando a perder el 50% de su rigidez en la mayor cantidad de ciclos

5.3 Contrastación de hipótesis.

“Los polímeros elastómero termoplástico sintético tienen influencia significativa en la mejora de las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla asfáltica altamente modificada, determinadas mediante ensayos de laboratorio”.

5.3.1. Hipótesis general

H0: Los polímeros elastómero termoplástico sintético, no mejoran las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla asfáltica altamente modificada, determinadas a través de ensayos de laboratorio.

H1: Los polímeros elastómero termoplástico sintético mejoran las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla asfáltica altamente modificada, determinadas a través de ensayos de laboratorio.

Se acepta la hipótesis alternativa a un 95% de confiabilidad, porque según los ensayos ensayo de módulo de resiliencia que la mezcla convencional tiene un mayor coeficiente de variación en comparación con la mezcla modificada altamente modificada, en el ensayo de deformación (ver figura 31 y figura 22) se muestra que la mezcla altamente modificada es más homogénea en comparación con la mezcla convencional, lo mismo sucede en el ensayo de flexión de viga en 4 puntos módulo de (ver tabla 32 y figura 27) que la mezcla asfáltica altamente modificada tiene mayor rigidez a la flexión en comparación con la mezcla convencional.

5.3.2 Hipótesis específica 01

“Los polímeros elastómero termoplástico sintético mejoran la propiedad de la resistencia a la deformación de la mezcla asfáltica altamente modificada determinadas mediante los parámetros de Estabilidad y Flujo del ensayo Marshall”.

La contrastación estadística de las hipótesis específicas se emplea la distribución de probabilidad T Student para dos muestras independientes (prueba dos colas), el primero es para el diseño de mezcla asfáltica convencional y el segundo es para el diseño de mezcla altamente modificado con la adición de 8.0 % de polímeros elastómero

termoplástico sintético. Los parámetros Marshall a ser contrastados son la Estabilidad y el Flujo de las mezclas asfálticas convencionales y de las mezclas asfálticas altamente modificadas.

La **Estabilidad** de la mezcla asfáltica convencional es de 1242 kilogramos, mientras que de la mezcla modificada con adición de 8.0% de polímeros elastómero termoplástico sintético es de 1787 kilogramos; cuyos valores demuestran que la Estabilidad de la mezcla altamente modificada con polímeros elastómero termoplástico sintético es superior a la mezcla convencional en 545 kilogramos, la misma que representa una variación del 30.5%. En cuanto al requerimiento de los diseños, la estabilidad de la mezcla convencional y altamente modificada cumple con la Estabilidad mínima de 831 kg establecida según el manual de Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG - 2013.

H_0 : Al adicionar 8.0% de polímeros elastómero termoplástico sintético a la mezcla asfáltica; no existe diferencia significativa entre las dos medias de estabilidad, con respecto a la mezcla asfáltica convencional.

H_1 : Al adicionar 8.0 % de polímeros elastómero termoplástico sintético a la mezcla asfáltica; existe diferencia significativa entre las dos medias de estabilidad, con respecto a la mezcla asfáltica convencional.

Tabla 33
Análisis de T Student de la Estabilidad.

No. de muestra	Estabilidad MAC Convencional	Estabilidad Altamente Modificada 8.0%	Contraste Bilateral
1	1347.0	1811	Dos colas
2	1353.0	1787	$H_0: \mu_1 = \mu_2$
3	1351.0	1814	$H_0: \mu_1 = \mu_2$

Fuente: Elaboración propia.

Condición: Si $T \in \langle -t_{\alpha/2}, t_{\alpha/2} \rangle$, se acepta H_0 y se rechaza H_1 .

Tabla 34
Datos de análisis de T Student.

Descripción / Mezcla asfáltica	Convencional	Altamente Modificado con 8.0% de polímero
Tamaño muestra	$n = 3$	$m = 3$
Media muestral	$X = 1350$	$Y = 1804$
Varianza muestral	$S_x^2 = 349$	$S_y^2 = 646.3$
Grados de libertad:	$n + m - 2 = 4$	
Nivel de significancia al 95%	$\alpha = 0.05$	

- Determinación de la probabilidad de la distribución T Student:

$$T = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{\frac{(n-1)S_x^2 + (m-1)S_y^2}{n+m}}} \cdot \sqrt{\frac{nm(n+m-2)}{n+m}}$$

$$T = -35.542$$

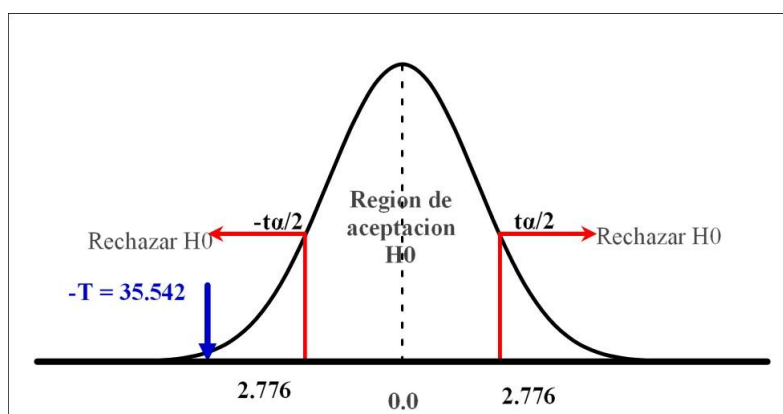
- Determinación de la región crítica: $t < -t_{\alpha/2}$ o $t > t_{\alpha/2} = t_{1-\alpha/2}$

$\alpha = 0.05$, $\alpha / 2 = 0.025$, $1 - \alpha / 2 = 0.975$, según la tabla de distribución t, con 4 grados de libertad se determina que $t_{-\alpha/2} = t_{1-\alpha/2} = 2.776$, por lo tanto, la región de aceptación será de: $R.A = \langle -2.776, 2.776 \rangle$.

- Decisión y conclusión: Como $T = -35.542$ no pertenece $R.A = \langle -2.776, 2.776 \rangle$, se rechaza H_0 , es decir que con 8.0% de polímero en la mezcla asfáltica altamente modificada existe una diferencia significativa a un nivel del 5%.

Figura 28

Contraste del valor T de la Estabilidad.



5.3.3 Hipótesis específica 02

Análisis Experimental: Módulo Resiliente (MPA) del espécimen 1 y 2.

Para el análisis del módulo resiliente se utilizó la tabla 33 y 34, donde se encuentran los datos para el análisis estadístico descriptivo.

Tabla 35

Análisis experimental del módulo resiliente

	Mezcla Experimental: Módulo Resiliente (MPA) Especimen 1	Mezcla Experimental: Módulo Resiliente (MPA) Especimen 2
Válido	5	5

Perdidos	0	0
Media	4233	4750
Mediana	4519,00	4610,00
Moda	4411	4481
Desv. Desviación	49.2	47.13
Varianza	9582,700	8688,200
C.Vx100%	1.17	0.99
Asimetría	0,490	-0,362
Error estándar de asimetría	0,913	0,913
Curtosis	0,015	-0,259
Error estándar de curtosis	2,000	2,000

Interpretación de los resultados descriptivos: Mezcla convencional: Espécimen Módulo Resilente (MPA) y Mezcla experimental: Espécimen1 Módulo Resilente (MPA). Para comparar cuando se analiza dos o más grupos su grado de dispersión u homogeneidad de sus datos es el coeficiente de variación siendo, considerando el que tenga menor valor en porcentaje el más homogéneo o grupo que tenga menor dispersión.

	Mezcla Convencional: Espécimen Módulo Resilente (MPA)	Mezcla Experimental: Espécimen Módulo Resilente (MPA)
Coefficiente de Variaciónx100%	2.37	1.17

Concluimos, existe mayor dispersión de los datos con respecto a su promedio en la convencional: Espécimen Módulo resilente (MPA).

5.3.4 Hipótesis específica 03

“Los polímeros elastómero termoplástico sintético mejoran la propiedad de resistencia al ahuellamiento de la mezcla asfáltica altamente modificada permanente determinados mediante el ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo. (AASTHO T 324)”.

La prueba de la Rueda Cargada para el diseño de la mezcla asfáltica convencional de 14,010 pasadas con una profundidad de 12.5 mm de ahuellamiento y para las mezclas asfálticas altamente modificada con 8.0% de polímero elastómero termoplástico sintético es de 20,000 pasadas una profundidad de 2.27 mm de ahuellamiento, existiendo una mejora en la cohesión y desprendimiento de la mezcla asfáltica altamente modificada en 81.84 %, para un 30 % mayor de numero de pasadas.

H₀: Al adicionar 8.0 % de polímeros elastómero termoplástico sintético asfáltica altamente modificada; no existe diferencia significativa entre las dos medias de la perdida por desgaste, respecto a la mezcla asfáltica convencional.

H₁: Al adicionar 8.0% de polímeros elastómero termoplástico sintético a la mezcla asfáltica altamente modificada; existe diferencia significativa entre las dos medias de la perdida por desgaste, respecto a la mezcla asfáltica convencional.

Tabla 36

Análisis de T student de resistencia al ahuellamiento permanente de la mezcla asfáltica.

Numero de pasadas	Resistencia al ahuellamiento permanente (mm)				Contraste Bilateral
	Convencional		Altamente Modificada con 8.0% Polímero		
	Parcial	Acumulado	Parcial	Acumulado	
0	0	0	0	0	
1000	1.00	1.00	0.70	0.70	
2000	0.90	1.90	0.29	0.99	
3000	0.60	2.50	0.01	1.00	
4000	1.50	4.00	0.05	1.05	
5000	1.50	5.50	0.05	1.10	
6000	1.50	7.00	0.15	1.25	
7000	0.50	7.50	0.05	1.30	
8000	0.50	8.00	0.10	1.40	Dos Colas Ho: $\mu_1 = \mu_2$ Ho: $\mu_1 \neq \mu_2$
9000	2.00	10.00	0.15	1.55	
10000	1.20	11.20	0.05	1.60	
11000	0.30	11.50	0.10	1.70	
12000	0.80	12.30	0.10	1.80	
13000	0.10	12.40	0.11	1.91	
14000	0.10	12.50	0.07	1.98	
15000			0.02	2.00	
16000			0.03	2.03	
17000			0.01	2.04	
18000			0.02	2.06	
20000			0.09	2.15	

Fuente: Elaboración propia.

Condición: Si $T \in \langle -t_{\alpha/2}, t_{\alpha/2} \rangle$, se acepta Ho y se rechaza H1.

Tabla 37*Datos estadísticos según tamaño de muestra de resultados*

Descripción / Mezcla	Convencional	Altamente Modificado con 8.0% polimero
Tamaño muestra	n = 14	m = 19
Media muestral	X = -1.14	Y = -0.70
Varianza muestral	$S_x^2 = 0.155$	$S_y^2 = 0.255$
Grados de libertad:	n + m - 2 = 31	
Nivel de significancia al 95%	$\alpha = 0.05$	

- Determinación de la probabilidad de la distribución T Student:

$$T = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{(n-1)S_x^2 + (m-1)S_y^2}} \cdot \sqrt{\frac{nm(n+m-2)}{n+m}}$$

$$T = -2.524$$

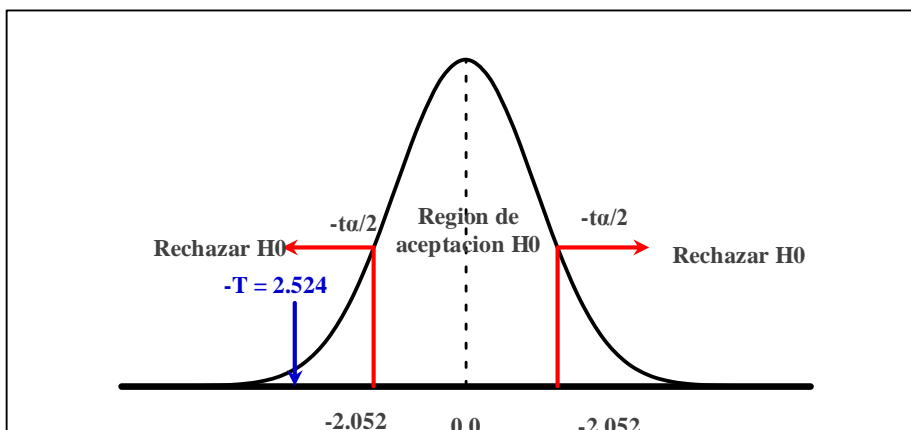
- Determinación de la región crítica: $t < -t_{\alpha/2}$ o $t > t_{\alpha/2} = t_{1-\alpha/2}$

$\alpha = 0.05$, $\alpha / 2 = 0.025$, $1 - \alpha / 2 = 0.975$, según la tabla de distribución t, con 31 grados de libertad se determina que $t_{-\alpha/2} = t_{1-\alpha/2} = 2.052$, por lo tanto, la región de aceptación será de: R.A = $\langle -2.052, 2.052 \rangle$.

- Decisión y conclusión como $T = -2.524$ no pertenece a R.A = $\langle -2.052, 2.052 \rangle$, se rechaza H_0 , es decir que la adición de 8.0% de polímero en la mezcla asfáltica, la diferencia es significativa a un nivel del 5%.

Figura 29.

Contraste del valor T de la resistencia al ahuellamiento permanente.



Fuente: Elaboración propia.

Concluida con las contrastaciones de las hipótesis específicas de las mezclas asfálticas en caliente altamente modificada con 7.5%, 8.0% y 8.5% de polímero elastómero termoplástico sintético respecto a las mezclas asfálticas en caliente convencional, se concluye que la adición de 8.0 % de polímero elastómero termoplástico sintético influye significativamente en el incremento de las propiedades físicas y mecánica de la mezcla asfáltica altamente modificada, con respecto a la mezcla asfáltica convencional.

5.3.5 Hipótesis específica 04

Los polímeros elastómero termoplástico sintético mejoran la propiedad de resistencia a la fatiga de la mezcla asfáltica altamente modificada permanente determinados mediante el ensayo de flexión de viga en cuatro puntos.

Como se puede observar en la fig. 27 donde la mezcla altamente modificada cumple con todos los requisitos de la normativa ASHTO 321-14, en cambio la mezcla asfáltica convencional no cumple los requisitos solicitados la resistencia a la flexión

mejora significativamente respecto a las demás mezclas asfálticas, llegando a perder el 50% de su rigidez en la mayor cantidad de ciclos.

5.4 Discusión de resultados

La discusión se realiza a partir de los resultados obtenidos en la investigación, las que son comparadas y contrastadas con los estudios similares realizados anteriormente, de las cuales se tiene la siguiente discusión:

a) Los resultados obtenidos de los parámetros del ensayo Marshall, es la Estabilidad y el Flujo, en la que se muestra la adición de 8.5% de polímero tiene mejor comportamiento a la deformación de la mezcla asfáltica en comparación con las otras proporciones de adición.

La Estabilidad del diseño de mezcla asfáltica convencional es de 1242 kg, mientras que de la mezcla modificada con adición de 8.5% de polímero es de 1814 kg; lo que demuestra que la Estabilidad de la mezcla altamente modificada con polímero es superior a la mezcla convencional en 572 kg la misma que equivale a 31.53%.

El Flujo del diseño de mezcla asfáltica convencional es de 3.65 (0.01”), mientras que de la mezcla modificada altamente modificada con 8.5% de polímero es de 3.75 (0.01”); lo que demuestra que el flujo de la mezcla altamente modificada con polímero es mayor a la mezcla convencional en 0.1 (0.01”), la misma que equivale a 2.67%.

Según Reyes, O. (2005), ha determinado los parámetros Marshall que es la Estabilidad presenta un incremento 26% con la adición de 0.6% de fibras polipropileno; mientras que el parámetro del Flujo presenta una reducción 3% con la adición de 0.45% de fibras. Los resultados mostrados de ambas investigaciones

no tienen coincidencias en sus valores obtenidos, esto puede explicarse las diferencias que existiría en la calidad de los agregados empleados; sin embargo, podemos determinar que la adición de fibras en la mezcla asfáltica si incrementan en la resistencia a la deformación.

b) La determinación del módulo de rigidez de la mezcla asfáltica altamente modificado resulta ser inferior en un 23.9% de módulo resiliente, en 1.20% de fuerza de carga y produce una mayor deformación recuperable en un 49.5% respecto a la mezcla asfáltica convencional.

Corbacho, (2019) afirma que “las muestras con mezcla modificada con fibras PET presentaron resultados de módulo resiliente promedio a 20°C de 2079 MPa y módulo resiliente promedio a 25°C de 1377 MPa. Resultados que son 37% más bajos en comparación a la mezcla asfáltica convencional analizada”.

c) La determinación de la resistencia al ahuellamiento permanente mediante el ensayo de la Rueda Cargada para el diseño de la mezcla asfáltica convencional de 14010 pasadas con una profundidad de 12.5 mm de ahuellamiento y para la mezcla asfáltica altamente modificada con 8.0 % de polímero es de 20000 pasadas, una profundidad de 2.27 mm de ahuellamiento, existiendo una mejora en la cohesión y desprendimiento de la mezcla asfáltica altamente modificada en en 5,990 pasadas, la misma que representa el 42.76% de mejora en la disminución.

Según Reyes, O. (2005), ha determinado la disminución del ahuellamiento según el ensayo de la Rueda Cargada una profundidad de 12.5mm en mezcla asfáltica

convencional y 8.8mm en mezcla asfáltica modificada con la adición de 0.6% de fibras de polipropileno, la misma que representa en 28% de ahuellamiento para 5,000 pasadas de ida y vuelta.

Así mismo en los resultados descritos de ambas investigaciones no tiene coincidencias, ni aproximaciones en los valores obtenidos, estas diferencias se pueden atribuir a la calidad de los agregados empleados; sin embargo, se puede precisar que las fibras de polipropileno si contribuyen en el mejoramiento en la disminución del ahuellamiento en la mezcla asfáltica en caliente.

d) La determinación de la resistencia a la fatiga mediante el ensayo de flexión de la viga en 4 puntos para la mezcla asfáltica altamente modificada con polímero elastómero termoplástico sintético de 8.0% la resistencia a la flexión mejora significativamente respecto a las demás mezclas asfálticas, llegando a perder el 50% de su rigidez en la mayor cantidad de ciclos.

No se han encontrado el desarrollo de estudios de mezclas asfálticas altamente modificadas mediante el ensayo de flexión de viga en 4 puntos.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Conclusión General

1. Los polímeros elastómero termoplásticos sintéticos incrementan las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas altamente modificadas, según los resultados de resistencia a la deformación mediante el parámetro de Estabilidad; la mezcla asfáltica altamente modificada es superior en 572 kg o un 31.53% respecto de una mezcla asfáltica convencional, la deformación recuperable de una mezcla asfáltica altamente modificada es superior 49.5% respecto de una mezcla asfáltica convencional, la resistencia al ahuellamiento permanente de una mezcla asfáltica altamente modificada es superior en 81.76% en promedio respecto de una mezcla asfáltica convencional.

Conclusiones Especificas

2. Los polímeros elastómero termoplásticos sintéticos tienen una influencia significativa en la mejora de la resistencia a la deformación de la mezcla asfáltica altamente modificada, con 7.5%, 8.0% y 8.5% de polímero en relación al peso del asfalto; para lo cual se ha preparado probetas de los diseños de mezcla asfáltica en caliente convencional y altamente modificada con polímeros de acuerdo a los requerimientos de diseño establecida por el Manual de Ensayos de Materiales - 2016, evaluándose que la adición de 8.5% de polímero tiene mejor comportamiento a la resistencia a la deformación; cuyos resultados obtenidos según
 - La Estabilidad del diseño de mezcla asfáltica convencional es de 1242 kg, mientras que de la mezcla altamente modificada con 8.5% de polímero es de 1814 kg; lo que demuestra que la estabilidad de la mezcla altamente modificada es superior a la mezcla convencional en 572 kg la misma que equivale a 31.53%.

- El Flujo del diseño de mezcla asfáltica convencional es de 3.65 (0.01”), mientras que de la mezcla modificada altamente modificada con 8.5% de polímero es de 3.75 (0.01”); lo que demuestra que el flujo de la mezcla altamente modificada con polímero es mayor a la mezcla convencional en 0.1 (0.01”), la misma que equivale a 2.67%.
3. Los polímeros elastómero termoplásticos sintéticos incrementan significativa en la mejora de la resistencia a la deformación elástica de la mezcla asfáltica altamente modificada , para analizar se ha preparado probetas cilíndricas de 101.6mm de diámetro y 63.5mm de altura de las mezcla asfáltica convencional y altamente modificada con porcentajes de 7.5%, 8.0% y 8.5% en relación al peso del asfalto, estas probetas son sometidas al esfuerzo de deformación elástica en el Ensayo de módulo resiliente, cumpliendo el procedimiento indicado en la norma AASHTO TP-31; de los resultados obtenidos se puede afirmar que los polímeros elastómero termoplásticos sintéticos incrementan la resistencia a la deformación y flexión elástica de la mezcla asfáltica altamente modificada : La determinación del módulo de rigidez de la mezcla asfáltica altamente modificado resulta ser inferior en un 23.9% de módulo resiliente y 1.20% de fuerza de carga y produce una mayor deformación recuperable en un 49.5% respecto a la mezcla asfáltica convencional.
4. Los polímeros elastómero termoplásticos sintéticos incrementan la resistencia al ahuellamiento permanente ,cuyos resultados se muestran en la Tabla 31 y la figura 22 , la mezcla asfáltica altamente modificadas con porcentajes de 7.5%,8.0% y 8.5% de polímero elastómero termoplástico sintético tienen una deformación de 2.64 mm,2.27 mm y1.93 mm respectivamente superando ampliamente los

requisitos de la Norma AASHTO T-324 por lo que se puede afirmar que las mezclas asfálticas altamente modificadas son 81.76% en promedio más resistente a la deformación permanente respecto de una mezcla asfáltica convencional incluso para un 30% (5,990) mayor de número de pasadas.

Recomendaciones

1. Se deben realizar estudios donde se determine el resultado de la incorporación de los polímeros elastómero termoplásticos sintéticos en combinación con productos naturales existentes en el Perú, para mejorar las propiedades físicas y mecánicas en las mezclas asfálticas con un menor costo de producción y más accesible a la necesidad del mercado nacional.
2. Se debe realizar ensayos según los parámetros Marshall de estabilidad y fluencia para evaluar la resistencia a la deformación de mezclas asfálticas altamente modificadas con 7.6%, 7.7% ,7.8% y 7.9% de polímeros elastómero termoplásticos sintéticos para observar la variación de la propiedades de la mezcla asfáltica altamente modificada próximos al 7.5% que es el mínimo en este estudio.
3. Se debe realizar el ensayo de la Rueda Cargada para evaluar la resistencia al ahuellamiento permanente de mezclas asfálticas adición 1.0%,2.0%,5.0%, 9.0% y 12% de polímeros elastómero termoplásticos sintéticos para determinar puntos intermedios que se adecuen a la curva tendencia..
4. Para verificar los beneficios de las propiedades encontradas en esta investigación de la mezcla asfáltica altamente modificada con polímeros elastómero termoplásticos sintéticos, debe realizar la evaluación funcional y estructural tomando pruebas en campo del tramo ejecutado que permitan establecer el desempeño de las mezclas asfálticas in situ.
5. Se debe tener el mayor cuidado posible en la selección y verificación de la calidad de los agregados con que se fabrican las mezclas asfálticas, considerando que éstos conforman la estructura principal de la mezcla asfáltica, por lo tanto, su capacidad de resistir las cargas actuantes tiene relación directa con su durabilidad.

Referencias bibliográficas

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).
Mechanistic Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice. AASHTO,
Washington, D.C., 2008.
- ASTM D7460-10. Standar Test Method for Determining Fatigue Failure of Compacted
Asphalt Concrete Subjected to Repeated Flexural Bending.
- ASTM International. (2012). Standar Test Method for Determination of Draindown
Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures. Washington D.C.: ASTM Int'l.
- AASHTO. (s.f.). Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture Induced
Damage. Washington D.C.: AASHTO.
- Adauto, R. (2019). Comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica en caliente con
adición de ceniza de caña de maíz. (Tesis de posgrado) Universidad Ricardo Palma.
Perú.
- Bessa, Vasconcelos, Castelo Branco, Bernucci, (2019), publicación “Evaluación de
aglutinantes asfálticos puros y modificados en relación con el agrietamiento por
fatiga mediante caracterización reológica” Universidad de Sao Paulo, Brasil.
- Bocanegra, D. (2020). Tesis de maestría “Comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas
modificadas con hule molido de vulcanizado”, Universidad Autónoma de
Queretaro, Queretaro, Mexico
- Blazejowski, Wójcik, Peciakowski, Olszacki (2016), publicación “El rendimiento de
aglutinantes de alta resistencia altamente modificados en pavimentos de asfalto”
6th Transport Research Arena April 18-21.

- Casanova,W.(2017). Tesis de maestría “determinación de una metodología para caracterizar asfaltos modificados con polímero usados en pavimentos flexibles”,Universidad Autónomas de Queretaro,Queretaro,Mexico.
- Cichocki,P. Thesis Master “Application of Highly Modified Asphalt (HiMA) Binders in Implementation and Thickness Optimization of Perpetual Pavements in Ohio”, Ohio University,Ohio, United States.
- De La Cruz, E. (2019). Estabilización de mezclas asfálticas Stone Mastic Asphalt utilizando fibras de basalto como sustituto de las fibras de celulosa. (Tesis de posgrado). Universidad Ricardo Palma. Perú.
- Di Benedetto, H., De La Roche, C., Baaj, H., Pronk, A., & Lundström, R. Fatigue of bituminous mixtures. *Materials and Structures*, 2004, vol. 37(3), p. 202-216.<http://dx.doi.org/10.1007/BF02481620>
- Estrada, V. R. (2017). Tesis de Ingeniería Civil “Estudio y Análisis de Desempeño de Mezcla Asfáltica Convencional PEN 85/100 Plus y Mezcla Asfáltica Modificada con Polímero Tipo SBS 70-28”, Universidad Andina del Cusco, Cusco, Perú.
- Figuroa, et al. (2007). Análisis de un asfalto modificado con poliestireno y su incidencia en una mezcla asfáltica densa en caliente. *Revista Ingeniería e Investigación Volumen (27) No.3*, (diciembre de 2007), pp. 5-15.
- Galindo,A. (2020).Tesis de Maestria “Evaluacion de mezclas asfálticas mediante tensión indirecta y resistencia al desgaste empleando asfaltos modificados”,Universidad Autónoma de Chihuahua,Chihuahua,Mexico.
- Instituto del Asfalto (1982), *Manual de Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente MS.22*. Lexington, Estados Unidos: Asphalt Institute.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013). Manual de Carreteras – Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG-2013. Lima, Perú.

- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2016). Manual de Ensayo de Materiales. Lima, Perú.
- Norma AASHTO T 324 (2014). Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA).
- Norma AASHTO TP 31 (1996). Standard Test Method For Determining The Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension.
- Peña, J. (2019). Desempeño mecánico de la mezcla asfáltica en caliente incorporando cenizas volantes provenientes de la termoeléctrica de Ilo. (Tesis de posgrado). Universidad Ricardo Palma. Perú.
- Pfeiff,Kroger (2019) publicacion “Análisis comparativo del desempeño de cementos asfálticos altamente modificados” publiacion;congreso latinoamericano de asfalto,XX CILA,Mexico 2019. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/346650525_ANALISIS_COMPARATIVO_DEL_DESEMPENO_DE_CEMENTOS_ASFALTICOS_ALTAMENTE_MODIFICADOS.
- Rondón y Reyes. (2011). Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente modificada con un desecho de PVC. Revista Tecno Lógicas No. 27, ISSN 0123 - 7799, (diciembre de 2011), pp.11-31
- Suarez,P (2018). Tesis de Maestría “Desarrollar y comparar un diseño de mezclas asfálticas convencionales y mezclas asfalaticas con anotubos de carbono mediante método Marshall”.Universidad Catolica de Loja,Ecuador.

Anexos

Anexo 1: Matriz de consistencia.	117
Anexo 2 resultado de Ensayos de realizados	118

Anexo 1: Matriz de consistencia.

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLES GENERALES	INDICADOR	METODO
¿De qué manera la adición de polímero elastómero termoplástico sintético (SBS) mejoran las propiedades físicas y mecánicas de una mezcla asfáltica altamente modificada, determinados mediante ensayos de laboratorio?	Determinar el porcentaje en que se incrementan las propiedades físicas y mecánicas de una mezcla asfáltica altamente modificada al adicionar polímeros elastómeros termoplásticos sintéticos (SBS), mediante ensayos de laboratorio.	La adición de polímeros elastómero termoplástico sintético a una mezcla asfáltica altamente modificada incrementan sus propiedades físicas y mecánicas, determinados mediante ensayos de laboratorio.	Modificación mediante adición de Polímeros Elastómero Termoplástico Sintético ----- Propiedades físicas y mecánicas de la Mezcla Asfáltica Altamente Modificada con Polímeros.		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Metodología de la investigación • Método: Deductivo • Orientación: Aplicada • Enfoque: Cuantitativo • Toma de datos: Retroelectiva.
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVO ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	VARIABLES ESPECÍFICAS	INDICADORES ESPECIFICOS	
¿De qué manera la adición de polímeros elastómero termoplástico sintético mejora la propiedad de resistencia a la deformación de una mezcla asfáltica altamente modificada, mediante los parámetros de Estabilidad y Flujo del ensayo Marshall?	Determinar el porcentaje en que se incrementa la propiedad de resistencia a la deformación de una mezcla asfáltica altamente modificada al adicionar polímeros elastómeros termoplásticos sintéticos, mediante los parámetros de Estabilidad y Flujo del ensayo Marshall.	La adición de polímeros elastómeros termoplásticos sintéticos a una mezcla asfáltica altamente modificada incrementa la propiedad de resistencia a la deformación, determinadas mediante los parámetros de Estabilidad y flujo del ensayo Marshall.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Polímeros Elastómero Termoplástico Sintético ✓ Resistencia a la deformación. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Estabilidad ✓ Flujo 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Tipo de Investigación Descriptiva – Correlaciona-Explicativa. ✓ Nivel de Investigación Descriptivo – Relacional
¿De qué manera la adición de polímeros elastómero termoplástico sintético mejora la propiedad de resistencia a la flexión elástica de una mezcla asfáltica altamente modificada, mediante el ensayo de Módulo Resilente?	Determinar el porcentaje en que se incrementa la propiedad de resistencia a la flexión elástica de una mezcla asfáltica altamente modificada al adicionar polímeros elastómeros termoplásticos sintéticos, mediante el ensayo de Módulo Resilente.	La adición de polímeros elastómero termoplástico sintético a una mezcla asfáltica altamente modificada incrementa la propiedad de resistencia a la deformación y flexión elástica, determinados mediante el Ensayo de Módulo Resilente.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Polímeros Elastómero Termoplástico Sintético. ✓ Resistencia a la deformación y flexión elástica. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Resistencia a la deformación. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Diseño de la Investigación • Diseño: Experimental-Prospectivas-Longitudinal
¿De qué manera la adición de polímeros elastómero termoplástico sintético mejora la propiedad de resistencia al ahuellamiento permanente de una mezcla asfáltica altamente modificada, mediante el ensayo de la Rueda Cargada?	Determinar el porcentaje en que se incrementa la propiedad de resistencia al ahuellamiento permanente de una mezcla asfáltica altamente modificada al adicionar polímeros elastómeros termoplásticos sintéticos, mediante el ensayo de la Rueda Cargada de Hamburgo.	La adición de polímeros elastómero termoplástico sintético a una mezcla asfáltica altamente modificada incrementa la propiedad de resistencia al ahuellamiento permanente, determinados mediante el ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Polímeros Elastómero Termoplástico Sintético ✓ Resistencia al ahuellamiento permanente. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ % de incremento del ahuellamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Estudio de diseño: Ensayo – Laboratorio; Estudio de Cohortes y

<p>¿De qué manera la adición de polímeros elastómero termoplástico sintética mejora la propiedad la propiedad de resistencia a la fatiga de una mezcla asfáltica altamente modificada, mediante el ensayo de la Flexión de Viga en Cuatro Puntos?</p>	<p>Determinar el porcentaje en que se incrementa la propiedad de resistencia a la fatiga de una mezcla asfáltica altamente modificada al adicionar polímeros elastómeros termoplásticos sintéticos, mediante el ensayo de Flexión de Viga en Cuatro Puntos.</p>	<p>La adición de polímeros elastómero termoplástico sintética a una mezcla asfáltica altamente modificada incrementa la propiedad de resistencia a la fatiga, determinados mediante el ensayo de Flexión de Viga en Cuatro Puntos.</p>	<p>✓ Polímeros Elastómero Termoplástico Sintético. . ✓ Resistencia a la fatiga</p>	<p>✓ % de rigidez a la flexión .</p>	<p>Estudio casos y control</p>
---	---	--	---	--------------------------------------	--------------------------------

ARCHIVO DE RESULTADOS:

<https://drive.google.com/drive/u/1/folders/0B28G-9IEMdMualhYQjRyS2RjSlk?resourcekey=0->

S1pt8OngJcCHf3iuR9HQ9V