

UNIVERSIDAD RICARDO PALMA
ESCUELA DE POSGRADO

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



Tesis para optar el Grado Académico de Maestro en Ingeniería Vial con
Mención en Carreteras, Puentes y Túneles

Mezcla asfáltica SMA, fibra, ceniza del bagazo de caña de azúcar y su
desempeño mecánico.

Autor: Bach. Mariano Bravo, Gelí Melquiades

Asesor: Dr. Valencia Gutiérrez, Andrés Avelino

Lima – Perú

2021

PÁGINA DEL JURADO

Presidente : Dr. Chung Pinzás, Alfonso Ramón
Miembro 1 : Mg. Aramayo Pinazo, Francisco Antonio
Miembro 2 : Mg. Mateo López, Hugo Julio
Asesor : Dr. Valencia Gutiérrez, Andrés Avelino

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

LABORATORIO CAH CONTRATISTAS GENERALES S.A.

ESCUELA DE POSGRADO - URP.

DEDICATORIA

La investigación es dedicada a mi madre Catalina que en paz descanse, a mi padre Heli por su constante apoyo incondicional, a mi esposa Linlly y mi hijo Adriel que me brindan su amor y la fuerza para seguir adelante.

AGRADECIMIENTO

A Dios por brindarme salud y protección en los momentos más difíciles y frustrantes de mí vida.

A mis padres por todos los consejos y apoyo brindado, a mi esposa e hijo por la paciencia y comprensión, a mi hermano y hermana.

Un agradecimiento especial al Dr. Andres A. Valencia Gutierrez, por su paciencia, su exigencia, su motivación y sus conocimientos transmitidos para la elaboración de la presente tesis.

ÍNDICE GENERAL

PÁGINA DEL JURADO.....	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
RESUMEN	XIV
ABSTRACT.....	XV
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.1. Descripción del problema:	3
1.2. Formulación del problema:	4
1.2.1. Problema general:	4
1.2.2. Problemas específicos:	4
1.3. Importancia del estudio:	5
1.4. Justificación del estudio:	5
1.3.1 Justificación económica:	5
1.3.2 Justificación teórica:	6
1.3.3 Justificación metodológica:	6
1.5. Delimitación del estudio:	8
1.5.1 Delimitación espacial:.....	8
1.5.2 Delimitación temporal:	8
1.5.3 Delimitación teórica:.....	8
1.5.4 Delimitación clima:	8
1.6. Limitación COVID - 19:	8
1.7. Objetivos de la investigación.	9
1.7.1. Objetivo general:	9

1.7.2. Objetivos específicos:	9
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.	10
2.1. Marco histórico:	10
2.2. Investigaciones relacionadas con el tema:	15
2.2.1. Investigaciones internacionales:	15
2.2.2. Investigaciones nacionales:	20
2.3. Estructura teórica y científica que sustenta el estudio:	24
2.3.1. Pavimento Asfáltico:	24
2.3.1.1. Estructura del Pavimento Asfáltico:	25
2.3.2. Materiales Asfálticos.....	27
2.3.2.1. Cemento asfáltico:	27
2.3.2.2. Comportamiento mecánico del cemento asfáltico:.....	28
2.3.3. Mezcla asfáltica	28
2.3.3.1. Tipos de mezclas asfálticas:	30
2.3.3.2. Asfaltos modificados:	31
2.3.4. Diseño de mezclas asfálticas S.M.A.	33
2.3.5. Mezclas asfálticas con la tecnología Stone Mastic Asphalt (S.M.A.):	34
2.3.6. Comportamiento de mezclas asfáltica SMA.....	35
2.3.7. Componentes de la mezcla asfáltica SMA:	36
2.3.7.1. Agregado grueso:.....	37
2.3.7.2. Agregado fino.....	38
2.3.7.3. Filler:.....	39
2.3.7.4. Asfalto:.....	41
2.3.7.5. Agente estabilizante:.....	41
2.3.7.6. Estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica:.....	47
2.3.8. Desempeño mecánico de la mezcla asfáltica SMA	48
2.3.8.1. Deformación permanente en mezclas asfálticas:.....	48
2.3.8.2. Daño por humedad en mezclas asfálticas:	50
2.3.8.3. Módulo Resiliente en mezclas asfálticas	51
2.4. Definición de términos básicos:	53

2.5.	Fundamentos teóricos que sustenta las hipótesis	55
2.6.	Hipótesis.	55
2.6.1.	Hipótesis general:.....	55
2.6.2.	Hipótesis específicas:	56
2.7.	Variables:.....	56
2.7.1.	Definición conceptual de la variable	56
2.7.2.	Operacionalización de las variables	57
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO.....		58
3.1.	Tipo, método y diseño de la investigación:	58
3.1.1.	Método de investigación:	58
3.1.2.	Tipo de investigación	58
3.1.3.	Nivel de la investigación	59
3.1.4.	Diseño de la investigación.....	59
3.1.5.	Estudio del diseño	60
3.2.	Población y muestra:	60
3.3.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos:	61
3.3.1.	Instrumento de recolección de datos:	61
3.3.2.	Validez del instrumento.....	64
3.3.3.	Confiablez del instrumento	64
3.4.	Descripción de procedimientos de análisis:.....	64
3.4.1.	Caracterización de los agregados.....	64
3.4.1.1	Agregado grueso.....	64
3.4.1.2	Agregado fino.....	67
3.4.2.	Diseño de mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza de bagazo de caña de azúcar.....	70
3.4.2.1	Combinación de agregados grueso y fino	70
3.4.2.2	Calculo del diseño de mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar.	74
3.4.2.3	Calculo del diseño de mezcla asfáltica SMA con celulosa y cal hidratada.	79

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	84
4.1. Resultados con respecto a la reducción del escurrimiento de la mezcla SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar:	84
4.1.1. Resultado de la resistencia de la mezcla asfáltica SMA compactadas al daño inducido por la humedad	84
4.1.1.1 Escurrimiento de la fibra de bagazo de caña de azúcar.	84
4.1.1.2 Daño por humedad de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar	85
4.1.1.3 Daño por humedad de la mezcla asfáltica SMA con celulosa y cal hidratada (convencional)	88
4.1.2. Resultado de la deformación permanente de la mezcla SMA	89
4.1.2.1 Flujo de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar.....	89
4.1.2.2 Deformación de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar	91
4.1.3. Resultado de elasticidad de la mezcla asfáltica SMA	94
4.1.3.1 Estabilidad de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar	94
4.1.3.2 Módulo de resiliente de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar	96
4.1.3.3 Módulo de resiliente de la mezcla asfáltica SMA con celulosa y cal hidratada (convencional).....	100
4.2. Análisis de los resultados o discusión de resultados	103
4.2.1. Análisis de resultados al daño inducido por la humedad.	103
4.2.2. Análisis de resultados de la deformación permanente	104
4.2.3. Análisis de resultado de elasticidad	105
4.3. Análisis descriptivo y prueba de hipótesis	106
4.3.1. Hipótesis general.....	106
4.3.2. Hipótesis específica 1	107
4.3.2.1 Análisis descriptivo del daño por humedad - Estado seco STD.	107

4.3.2.2	Análisis Inferencial del daño por humedad - Estado seco STD.:	109
4.3.2.3	Análisis descriptivo del daño por humedad - Estado húmedo STM.	110
4.3.2.4	Análisis inferencial del daño por humedad - Estado húmedo STM.	112
4.3.2.5	Análisis de correlación del daño por humedad - Estado seco STD y húmedo STM.:	113
4.3.2.6	Contraste de normalidad del daño por humedad de la mezcla SMA experimental y convencional.	114
4.3.3.	Hipótesis específica 2.....	116
4.3.4.	Hipótesis específica 3.....	117
4.3.4.1	Análisis descriptivo de elasticidad – Modulo resilente	117
4.3.4.2	Análisis inferencial de elasticidad – Modulo resilente.	119
4.3.4.3	Análisis descriptivo de elasticidad – Deformación total recuperable.....	121
4.3.4.4	Análisis inferencial de elasticidad – Deformación total recuperable.	123
4.3.4.5	Contraste de normalidad del módulo resilente y deformación total recuperable de la mezcla SMA experimental y convencional.	124
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		127
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.		130
ANEXOS		133

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: CRONOLOGÍA DE LAS INVESTIGACIONES RELACIONAS AL TEMA.	11
TABLA 2: MATERIALES PARA MEZCLAS SMA.....	37
TABLA 3: REQUISITOS DE CALIDAD PARA AGREGADO GRUESO SMA.....	38
TABLA 4: REQUISITOS DE CALIDAD PARA AGREGADO FINO SMA	38
TABLA 5: PROPIEDADES QUÍMICAS.....	40
TABLA 6: COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR.....	40
TABLA 7: REQUISITOS DE CALIDAD DE LAS FIBRAS DE CELULOSA.....	42
TABLA 8: PROPIEDADES FÍSICAS DE LA FIBRA DE CELULOSA.....	44
TABLA 9: OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	57
TABLA 10: MUESTRAS DE ENSAYOS CON FIBRA Y CENIZA DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR.	60
TABLA 11: MUESTRAS DE ENSAYOS CON FIBRA CELULOSA Y CAL HIDRATADA.....	61
TABLA 12: NORMATIVAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS.	62
TABLA 13: ENSAYO DE LIGANTE.	63
TABLA 14: DISEÑO Y ENSAYOS DINÁMICOS.	63
TABLA 15: MATRIZ DE ANÁLISIS DE DATOS	64
TABLA 16: REQUERIMIENTOS PARA LOS AGREGADOS GRUESOS	65
TABLA 17: PROPIEDADES MECÁNICAS DEL AGREGADO GRUESO.....	65
TABLA 18: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO GRUESO	66
TABLA 19: REQUERIMIENTOS PARA LOS AGREGADOS FINOS.	68
TABLA 20: PROPIEDADES MECÁNICAS DEL AGREGADO FINO	68
TABLA 21: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO FINO.....	69
TABLA 22: GRANULOMETRÍA PARA MEZCLA STONE MASTIC ASPHALT.....	71
TABLA 23: COMBINACIÓN DE AGREGADO GRUESO Y FINO	72
TABLA 24: CALCULO DEL DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA SMA CON FIBRA Y CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR.....	74
TABLA 25: CARACTERÍSTICAS MARSHALL MODIFICADO CON FIBRA Y CENIZA DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR.....	78

TABLA 26: CALCULO DEL DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA SMA CON CELULOSA Y CAL HIDRATADA.....	79
TABLA 27: CARACTERÍSTICAS MARSHALL MODIFICADO CON CELULOSA Y CAL HIDRATADA	83
TABLA 28: REQUERIMIENTO PARA EL DISEÑO DE LA MEZCLA SMA.....	85
TABLA 29: DAÑO POR HUMEDAD DE LA MEZCLA ASFÁLTICA SMA CON FIBRA Y CENIZA DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR.....	86
TABLA 30: REQUISITO DE ADHERENCIA	87
TABLA 31: DAÑO POR HUMEDAD DE LA MEZCLA ASFÁLTICA SMA CON CELULOSA Y CAL HIDRATADA.....	88
TABLA 32: REQUISITOS PARA MEZCLA DE CONCRETO BITUMINOSO.....	90
TABLA 33: MÓDULO RESILENTE DE LA MEZCLA ASFÁLTICA SMA CON FIBRA Y CENIZA DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR – ESPÉCIMEN 1.....	96
TABLA 34: MÓDULO RESILENTE DE LA MEZCLA ASFÁLTICA SMA CON FIBRA Y CENIZA DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR – ESPÉCIMEN 2.....	98
TABLA 35: MÓDULO RESILENTE DE LA MEZCLA ASFÁLTICA SMA CON CELULOSA Y CAL HIDRATADA – ESPÉCIMEN 1.....	100
TABLA 36: MÓDULO RESILENTE DE LA MEZCLA ASFÁLTICA SMA CON CELULOSA Y CAL HIDRATADA – ESPÉCIMEN 2.....	102
TABLA 37: RESULTADO DEL ENSAYO DE TRACCION INDIRECTA - LOTTMAN MODIFICADO .	103
TABLA 38: RESULTADO DEL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO.....	104
TABLA 39: RESUMEN DE RESULTADO DE ELASTICIDAD - ENSAYO MÓDULO RESILENTE	105
TABLA 40: PRUEBA DE NORMALIDAD DEL DAÑO POR HUMEDAD DE LA MEZCLA SMA EXPERIMENTAL Y CONVENCIONAL	115
TABLA 41: ANÁLISIS CONVENCIONAL DEL MÓDULO RESILENTE.....	117
TABLA 42: ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL MÓDULO RESILENTE.....	118
TABLA 43: ANÁLISIS CONVENCIONAL DE LA DEFORMACIÓN TOTAL RECUPERABLE	121
TABLA 44: ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA DEFORMACIÓN TOTAL RECUPERABLE	122
TABLA 45: PRUEBA DE NORMALIDAD DEL MÓDULO RESILENTE Y LA DEFORMACIÓN TOTAL RECUPERABLE DE LA MEZCLA SMA EXPERIMENTAL Y CONVENCIONAL.....	125

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: METODOLOGÍA ADOPTADA PARA EL ESTUDIO.....	7
FIGURA 2: ESTRUCTURA TÍPICA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	25
FIGURA 3: COMPORTAMIENTO REAL DEL ASFALTO.....	28
FIGURA 4: ESQUEMA DE LA TIPOLOGÍA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS	29
FIGURA 5: COMPONENTE DE LA MEZCLA STONE MASTIC ASPHALT.....	33
FIGURA 6: COMPOSICIÓN DE UNA MEZCLA SMA	35
FIGURA 7: COMPARACIÓN ENTRE UNA MEZCLA SMA Y UN SUPERPAVE	36
FIGURA 8: FIBRA DE CELULOSA RECUBIERTA CON BETÚN.....	43
FIGURA 9: PLANTA DE CAÑA DE AZÚCAR.....	45
FIGURA 10: ESQUEMÁTICA DEFORMACIÓN-PASADAS (CICLOS) POR SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD	50
FIGURA 11: CONFIGURACIÓN DE LA CARGA (A) Y ROTURA DEL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA (B).....	51
FIGURA 12: PRUEBA DE MÓDULO RESILIENTE SEGÚN LA NORMA ASTM D4123-82	52
FIGURA 13: FUNDAMENTOS TEÓRICOS	55
FIGURA 14: CURVA GRANULOMÉTRICA DEL AGREGADO GRUESO	67
FIGURA 15: CURVA GRANULOMÉTRICA DEL AGREGADO FINO.	70
FIGURA 16: CURVA GRANULOMÉTRICA DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS	73
FIGURA 17: ESCURRIMIENTO DE MEZCLA ASFÁLTICA SMA CON FIBRA Y CENIZA DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR.	84
FIGURA 18: ENSAYO DE LOTTMAN MODIFICADO EN CONDICIÓN SECA.	87
FIGURA 19: ENSAYO DE LOTTMAN MODIFICADO EN CONDICIÓN HUMEDA.....	87
FIGURA 20: RESULTADO DEL FLUJO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA SMA CON FIBRA Y CENIZA DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR.....	90
FIGURA 21: RESULTADO DEL FLUJO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA SMA CON FIBRA CELULOSA Y CAL HIDRATADA.....	91
FIGURA 22: DIAGRAMA DE DEFORMACIÓN PERMANENTE DE LA MEZCLA SMA CON FIBRA Y BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR.....	92

FIGURA 23: RESULTADO DEL AHUELLAMIENTO DE LA RUEDA CARGADA A LA MEZCLA ASFÁLTICA SMA CON FIBRA Y CENIZA DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR.....	92
FIGURA 24: DIAGRAMA DE DEFORMACIÓN PERMANENTE DE LA MEZCLA SMA CON CELULOSA Y CAL HIDRATADA.....	93
FIGURA 25: ESTABILIDAD DE LA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA	94
FIGURA 26: ESTABILIDAD DE LA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL	94
FIGURA 27: DIAGRAMA DEL MÓDULO RESILENTE DE LA MEZCLA ASFÁLTICA SMA CON FIBRA Y CENIZA DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR – ESPÉCIMEN 1.....	97
FIGURA 28: DIAGRAMA DEL MÓDULO RESILENTE DE LA MEZCLA ASFÁLTICA SMA CON FIBRA Y CENIZA DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR – ESPÉCIMEN 2.....	98
FIGURA 29: RESULTADO DEL ENSAYO DE MÓDULO RESILENTE.....	99
FIGURA 30: DIAGRAMA DEL MÓDULO RESILENTE DE LA MEZCLA ASFÁLTICA SMA CON CELULOSA Y CAL HIDRATADA – ESPÉCIMEN 1.....	101
FIGURA 31: DIAGRAMA DEL MÓDULO RESILENTE DE LA MEZCLA ASFÁLTICA SMA CON CELULOSA Y CAL HIDRATADA – ESPÉCIMEN 2.....	102

RESUMEN

Esta investigación es de enfoque cuantitativo, que surge ante el incremento considerable del parque automotor ocasionando deterioro del pavimento, fisuras, huecos, ahuellamiento y su rápido envejecimiento del asfalto, reduciendo su serviciabilidad y para solucionarlo se propuso como objetivo “Diseñar una mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar, a fin de mejorar su desempeño mecánico, a través de ensayos de laboratorio”. La investigación consiste específicamente de reemplazar el 100% la fibra celulosa y la cal hidratada, con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar, que se utiliza como estabilizante y como filler en una mezcla asfáltica SMA, utilizando el método deductivo, teniendo como diseño óptimo de la mezcla asfáltica modificada: como granulometría discontinua, 7% de asfalto, 0.3% de fibra y 6% de ceniza del bagazo de caña de azúcar, obteniendo como resultado: menor escurrimiento, mayor flujo, menor estabilidad, menor adherencia, mayor deformación permanente, menor módulo resiliente de la mezcla asfáltica modificada, no cumpliendo los requerimientos mínimos para una mezcla asfáltica SMA, que nos llevó a la conclusión, que para estabilizar la mezcla, la fibra del bagazo de caña de azúcar reemplaza al 100% a la fibra celulosa, pero para el filler de la mezcla, la ceniza del bagazo de caña de azúcar no reemplaza a la cal hidratada, por carecer en su composición química al óxido de calcio CaO.

Palabras claves: Desempeño, celulosa, cal hidratada, fibra y ceniza de caña de azúcar.

ABSTRACT

This research is of a quantitative approach, which arises in the face of the considerable increase of the automotive park causing deterioration of the pavement, cracks, hollowing and its rapid aging of the asphalt, reducing its serviceability and to solve it was proposed as a objective "Design an asphalt mixture SMA with fiber and ash of the sugarcane bagasse, in order to improve its mechanical performance, through laboratory tests". The research consists specifically of replacing 100% cellulose fiber and hydrated lime, with fiber and ash from the sugarcane bagasse, which is used as a stabilizer and as a filler in an asphalt mixture SMA, using the deductive method, having as optimal design of the modified asphalt mixture: as discontinuous granulometry, 7% asphalt, 0.3% fiber and 6% ash from the sugarcane bagasse , obtaining as a result: less runoff, greater flow, less stability, lower adhesion, greater permanent deformation, lower repellent module of the modified asphalt mixture, not meeting the minimum requirements for an asphalt mixture SMA, which led us to the conclusion, that to stabilize the mixture, the fiber of the sugarcane bagasse replaces 100% the cellulose fiber, but for the filler of the mixture, but for the filler of the mixture , the ash from the sugarcane bagasse does not replace the hydrated lime, because it lacks in its chemical composition the calcium oxide CaO.

Keywords: Performance, cellulose, hydrated lime, fiber and sugar cane ash.

INTRODUCCIÓN

En el Perú la mayoría de los pavimentos asfálticos fueron hechos con mezclas asfálticas en caliente con el método Marshall donde intervienen la granulometría continua, asfalto y un mejorador de adherencia. Por ello no soporta los tráficos pesados, existiendo en el pavimento fallas como ahuellamiento, fisuras, huecos, envejecimiento prematuro, etc. reduciendo su servicibilidad del pavimento. Por eso se requiere innovar el diseño de mezclas asfáltica con nuevas tecnologías internacionales, como es el diseño de mezcla Stone Mastic Asphalt (SMA) que se viene utilizando más de 50 años fuera del Perú, para tráficos pesados.

El diseño de mezcla asfáltica SMA convencional se diseña con fibra de celulosa derivado de la madera y como filler la cal hidratada de la cal viva, para poder obtener esos productos se tiene que realizar reacciones químicas, ocasionando en su proceso contaminación ambiental. Por eso se propone reemplazar al 100% la fibra celulosa por la fibra de bagazo de caña de azúcar y la cal hidratada por la ceniza de bagazo de caña de azúcar como filler. Según Berenguer (2017) afirma que “la ceniza del bagazo de caña de azúcar tiene un efecto aglutinante y puzolanico”. Con ello trataremos de reducir el uso de esos componentes de reacción química y disminuir la contaminación ambiental.

El método empleado en el trabajo consiste en determinar el porcentaje óptimo de fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar en la mezcla asfáltica SMA, utilizando una granulometría discontinua, porcentaje óptimo de asfalto, estabilidad, flujo y escurrimiento de la mezcla, para luego evaluar su desempeño mecánico con los ensayos de daño por humedad, deformación permanente y la elasticidad

La limitación que tiene la investigación fue el acceso a los laboratorios especializados que requiere el diseño de mezcla asfáltica, a causa de la pandemia global del COVID 19, retrasando el inicio de los estudios y los resultados del diseño. También que la mezcla está diseñada para soportar las condiciones climáticas de 0°C a 30°C de temperatura ambiental.

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

El capítulo I: Se describe la problemática de la mezcla asfáltica, así como la importancia y justificación de utilizar nuevas tecnologías y materiales en el diseño de mezcla, delimitar la investigación: espacial, temporal, teórica, clima y Covid 19. Y finalmente resolver los objetivos trazados en la investigación.

El capítulo II: se referencia a la teoría científica básica que sustenta la investigación como libros, manuales, normativas. Marco histórico se refiere a como la tecnología SMA fue avanzando en el tiempo. Las investigaciones relacionadas con el tema, son artículos, tesis, revistas que se parecen a la investigación. Y tiene que tener relación con las variables y las hipótesis.

El capítulo III: el marco metodológico se utiliza para poder desarrollar los objetivos, mediante el método, tipo, nivel y diseño de la investigación. Con una población y muestra a analizar, utilizando técnicas e instrumento de recolección de datos y finalmente describir los procedimientos de análisis de los datos.

Capítulo IV: se presenta el resultado y análisis de resultado, aquí mostrar todos los resultados de los objetivos propuestos, para luego discutir los resultados obtenidos con un patrón o investigaciones similares.

Finalmente se da respuesta a los objetivos propuestos con las conclusiones y para luego recomendar algunos aportes de la investigación referente al diseño de mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

1.1. Descripción del problema:

La problemática de la red vial nacional, departamental, vecinal y urbano en el Perú es tema de interés general para todos los usuarios y para el estado, esto es debido a que, además de la debilidad institucional, la carencia de infraestructura, deficiencia en innovación tecnológica, y en la protección del medio ambiente, también interviene en las amenazas potenciales a la calidad de vida e integridad de las personas, ya que no se brinda la calidad del servicio adecuado por tener variaciones climáticas y mala calidad de los materiales en el pavimento, perjudicando el confort y la transitabilidad de los usuarios.

En la actualidad en la mayoría de ciudades del Perú y el mundo, se viene desarrollando un incremento considerable en el parque automotor y como consecuencia se tiene el rápido deterioro del asfalto en las carreteras debido a la acción continua de tráfico, temperatura, rápido envejecimiento del pavimento y el bajo mantenimiento de la infraestructura vial; estos factores conllevan a que la mayoría de los tramos en la red vial no estén funcionando correctamente porque están disminuyendo su resistencia y durabilidad del pavimento; este deterioro pone en riesgo la transitabilidad de los usuarios con automóviles que están propensos a provocar o sufrir accidentes; todo ello se ve reflejado en la disminución del confort y seguridad en la vía.

Hoy en día en los trabajos de investigación en la ingeniería vial busca nuevas técnicas o métodos que nos ayude a reducir los costos de operación y mantenimiento en el pavimento, por ello que en diversas partes del mundo se vienen realizando constantes investigaciones para mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los asfaltos. Por ello la investigación es fomentar nuevas

tecnologías para ayudar a reducir costos de ejecución, mantenimiento, aumentar la durabilidad, mejorar la resistencia, disminuir el impacto ambiental, resistir a mayor tráfico pesado, para resolver toda esa problemática se va a diseñar una mezcla asfáltica con la tecnología Stone Mastic Asphalt utilizando como estabilizante a la fibra y como un filler la ceniza del bagazo de caña de azúcar, y medir su desempeño mecánico a través de ensayos.

Diversos estudios precedentes a este, certifican que las mezclas asfálticas S.M.A (Stone Mastic Asphalt) han mostrado excelentes resultados en cuanto a propiedades físico-mecánicas en la aplicación del pavimento. Este tipo de mezcla muestra características superiores al de las mezclas asfálticas convencionales; por otra parte también existen investigaciones en las cuales se modifica la composición de las mezclas bituminosas con el fin de mejorar el comportamiento de estas frente a la formación de fisuras y grietas, logrando de esta manera un mejor comportamiento a las deformaciones plásticas así como una mayor resistencia.

1.2. Formulación del problema:

1.2.1. Problema general:

¿De qué manera el diseño de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar, influye en la mejora del desempeño mecánico?

1.2.2. Problemas específicos:

- 1) ¿En qué medida la reducción del escurrimiento de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar, influye en la susceptibilidad al daño por humedad?
- 2) ¿En qué medida la reducción del flujo de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar, influye en la susceptibilidad a la deformación permanente?

- 3) ¿En qué medida la incrementación de la estabilidad de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar, influye en la elasticidad?

1.3. Importancia del estudio:

El uso de la fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar, como estabilizante y filler de la mezcla asfáltica SMA, es importante porque ayuda a conservar el medio ambiente y reutilizar un material que abunda en el país, ya que el estabilizante convencional de la mezcla SMA es la fibra celulosa y como filler la cal hidratada, que son contaminante y tiene un proceso químico en su fabricación.

También es valioso porque ayuda a mejorar el desempeño mecánico mejorando la resistencia a la tracción, reduciendo la deformación permanente, mejorando sus propiedades elásticas y soportando altos volúmenes de tránsito que cada día aumenta en el parque automotor. Con ello aumenta la durabilidad, mejora la resistencia y reduce los costos en la implantación de esta tecnología en las carreteras Peruanas.

1.4. Justificación del estudio:

1.3.1 Justificación económica:

Bustamante (2017), afirma que en la “construcción de obras viales es necesario realizar un análisis de costos para determinar su conveniencia de aplicación. Luego de haber realizado un análisis de costos entre mezclas SMA y convencionales se determina que las mezclas SMA son un 10.16% más costosas que las mezclas convencionales, este costo a largo plazo es más conveniente ya que las mezclas SMA al ser más durables necesitan menos recursos de inversión para su mantenimiento, produciendo rentabilidad económica en el tiempo y sería una materia de tiempo beneficio”.

Para elaborar el diseño de la mezcla SMA con fibra celulosa es más costoso que la mezcla experimental, porque la fibra en la producción de la mezcla SMA convencional aumenta el costo por ser un producto químico que se elabora

industrialmente costando 8 soles el kilogramo aproximadamente. En comparación con la mezcla SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar se reduce esa diferencia de costos porque la fibra natural es un desperdicio luego de utilizar el jugo de la caña, con ello se está dando un segundo uso. Comparando el costo en producción de la mezcla SMA, es más económico elaborar la mezcla con el bagazo de caña de azúcar, que con la fibra celulosa.

1.3.2 Justificación teórica:

La investigación tiene el propósito de aportar en conocimientos de utilización y aprovechamiento de nuevos materiales para la fabricación de mezclas asfálticas con la finalidad de mejorar su resistencia, aumentar la durabilidad y reducir costos de fabricación. Los aportes se va a generar a raíz de los resultados y conclusiones de los ensayos de laboratorio que se realizará a la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar, mejorando su desempeño mecánico con el óptimo parámetro volumétrico, reduciendo el escurrimiento asfáltico, incrementando la resistencia retenida a la tracción, disminuir la deformación permanente y mejorando sus propiedades elásticas.

1.3.3 Justificación metodológica:

Se justifica porque la metodología empleada para el desarrollo de la investigación, permite presentar una forma de abordar un tema de comparación entre dos mezclas con un mismo objetivo, tal como se muestra en la figura 1.

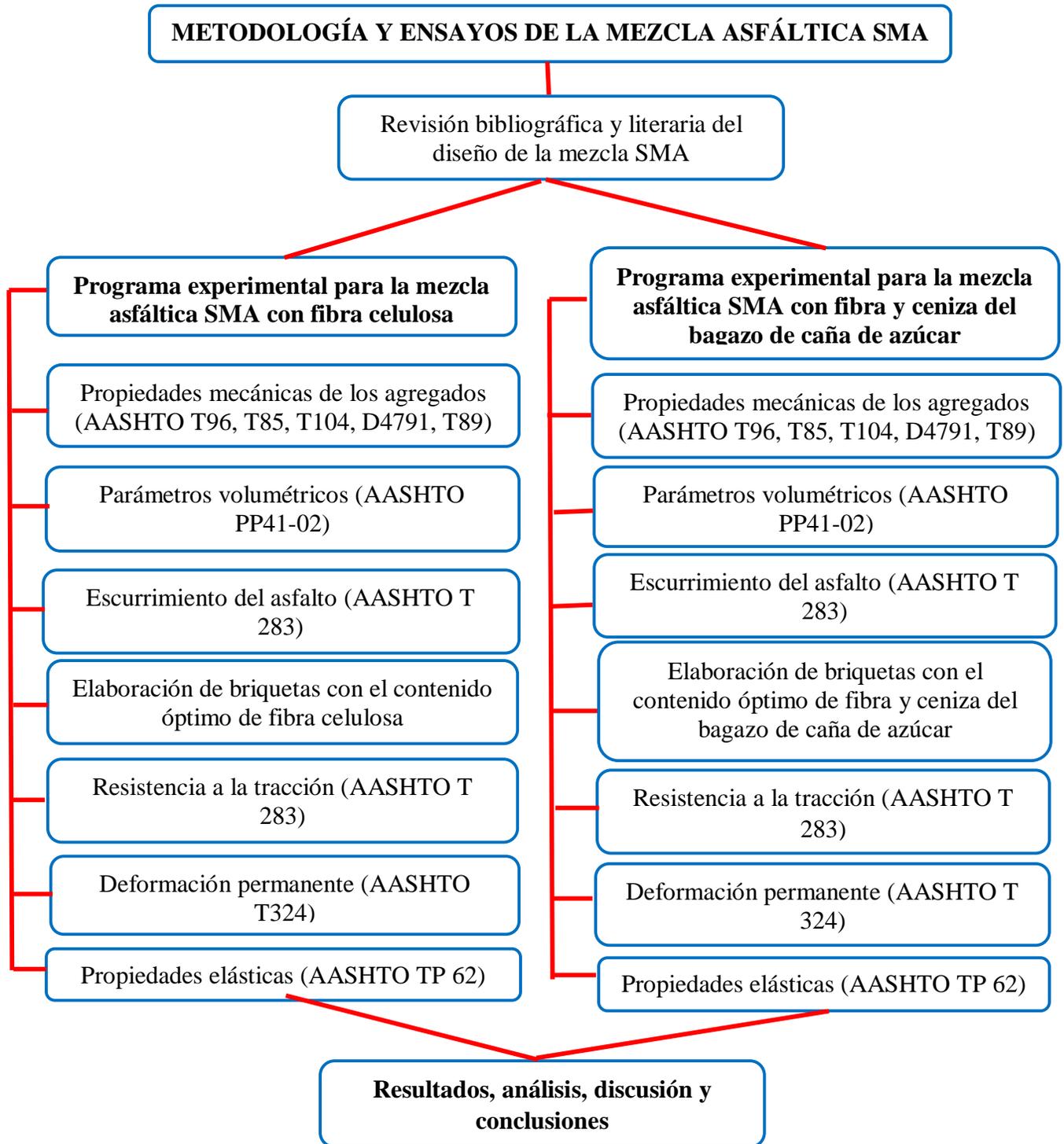


Figura 1: Metodología adoptada para el estudio.

Fuente: Elaboración propia.

1.5. Delimitación del estudio:

1.5.1 Delimitación espacial:

Para la investigación todos los estudios se realizarán en la ciudad de Lima, ya que el Perú es un país centralizado, donde la tecnología se encuentra en la capital y no en las provincias, por ello todos los ensayos van a estar sometidos a las condiciones más críticas que presentan las carreteras en el país como: tráfico pesado, clima, agregados, asfalto, temperatura, etc.

1.5.2 Delimitación temporal:

La presente investigación se propone estudiar el desempeño mecánico de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar a través de ensayos de laboratorio, que se realizará en la ciudad de Lima en los meses de julio y agosto del 2020.

1.5.3 Delimitación teórica:

En la investigación solo se utilizará la teoría, normativa y manuales de diseño de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar, y para poder determinar el desempeño de la mezcla se realizará los ensayos de laboratorio de tracción indirecta, rueda de Hamburgo y módulo resiliente, con ello se demostrará que el estabilizante natural cumple con los requerimientos del estudio.

1.5.4 Delimitación clima:

Para la investigación se realizará el diseño de mezcla para que soporte las condiciones climáticas de 0°C a 30°C de temperatura ambiental y poder analizar su desempeño para esas condiciones.

1.6. Limitación COVID - 19:

Esta investigación se ha visto perjudicada por no poder levantar información en el campo debido a la imposibilidad de desplazamiento como consecuencia de la cuarentena impuesta por el Gobierno Central del Perú.

1.7. Objetivos de la investigación.

1.7.1. Objetivo general:

Determinar de qué manera el diseño de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar, a fin de mejorar su desempeño mecánico, a través de ensayos de laboratorio.

1.7.2. Objetivos específicos:

- 1) Determinar en qué medida reduce el escurrimiento de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar, a fin de reducir la susceptibilidad al daño por humedad, a través del ensayo AASHTO T-283.
- 2) Determinar en qué medida reduce el flujo de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar, a fin de disminuir la susceptibilidad a la deformación permanente, a través del ensayo AASHTO T – 324.
- 3) Determinar en qué medida incrementa la estabilidad de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar, a fin de mejorar la elasticidad, a través del ensayo AASHTO TP – 31.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO.

2.1. Marco histórico:

Según el Asphalt Institute (2001), Las mezclas SMA, llamadas también Split Mastic Asphalt, “se crearon a finales de los años 60 en Alemania, debido a que en Europa, los problemas con los pavimentos empezaban a preocupar a las autoridades por los constantes deterioros producidos por llantas antideslizantes, utilizadas en época de nevada (ofrecían seguridad en caminos con nieve) y por la gran cantidad de vehículos que transitaba por las rutas de estos países”.

Según Gerhard y Rettenmaier (1968), “iniciaron un método alternativo de construcción para poder utilizar esta mezcla en áreas grandes; hasta esa fecha no vista. En tiempo anterior, solo se realizaron tratamientos de masillas (MASTIC TREATMENT), con el cual las áreas desiguales eran llenadas completamente con esta mezcla. Para demostrar el funcionamiento de esta mezcla, se extendió y se cubrió en un metro cuadrado, 12 – 15 kilogramos de mezcla líquida en caliente (MASTIC TREATMENT), con 28 – 35 kilogramos de agregado grueso, cuyo tamaño era de 5 - 8mm, siendo presionado por un smooth-wheeled (rodillo liso)”.

Con el transcurrir el tiempo se descubrió la fibra óptima para el diseño de mezcla SMA, es la fibra celulosa y es más fácil de trasladar, pavimentar, compactar y lo más principal evita el escurrimiento producido durante su proceso de elaboración y transporte.

En la tabla 1, se muestra una cronología de investigaciones similares, que se realizaron a lo largo del tiempo, modificando el diseño de mezcla SMA y Marshall, con fibras y cenizas. Las investigaciones son de diseño experimental utilizando materiales naturales y no contaminante en el proceso de producción.

Tabla 1:

Cronología de las investigaciones relacionadas al tema.

Autores	Universidad	País	Año	Investigación	Diseño de mezcla	Modificación
Wu, S., Xue. Et al	Building and Environment		2007	Artículo	Stone Mastic Asphalt (SMA)	Fibra de escoria de acero
Guzman Bocanegra, John	De Los Andes	Colombia	2008	Tesis Posgrado	Stone Mastic Asphalt (SMA)	Fibra de Nitinol
Al-Hadidy, A.I. and Tan, Y.Q	Construction and Building Materials		2009	Artículo	Stone Mastic Asphalt (SMA)	Fibra de polipropileno
Behnood, A. and Ameri, M.	Scientia Iranica A Transaction	Irán	2012	Artículo	Stone Mastic Asphalt (SMA)	Escoria de acero como porción de agregado grueso
Moghaddam, T.B. Et al	Construction and Building Materials		2012	Artículo	Stone Mastic Asphalt (SMA)	Fibra de residuo de tereftalato de polietileno PET

Qiang, X. Et al.	Construction and Building Materials		2013	Artículo	Stone Mastic Asphalt (SMA)	Fibra de paja de residuo agrícola
Preciado Bolivar, Carlos y Sierra Martinez, Carlos	Javeriana	Colombia	2013	Tesis Pregrado	Stone Mastic Asphalt (SMA)	Fibras desechas de procesos industriales
Rusbintardjo, G. Et al	Technical Paper		2014	Artículo	Stone Mastic Asphalt (SMA)	Ceniza del fruto de aceite de palma
Rodriguez Torres, Javier	Cantabria	España	2014	Posgrado	Marshall	Fibra de residuos de envases Brik
Shaffie, E. Et al	Applied Mechanics and Materials		2015	Artículo	Stone Mastic Asphalt (SMA)	Fibra de poliacrilonitrilo
Jiménez Rojano, Cristian	Técnica de Ambato	Ecuador	2016	Pregrado	Stone Mastic Asphalt (SMA)	Fibra de coco

Bejarano lopez, Jeisson y Caicedo Garcia, Carlos	Católica	Colombia	2017	Pregrado	Marshall	Fibra natural de caña de azúcar
Betancourt Chavez, Julio. Et al	Congreso Asfalto	México	2017	Artículo	Stone Mastic Asphalt (SMA)	Fibra celulosa más polvo de mármol
Diaz Giraldo, Jairo y Bonilla Murillo, Alvaro	Piloto de Colombia	Colombia	2018	Pregrado	Marshall	Fibra de vidrio
López Avilés, Paul	Cuenca	Ecuador	2018	Posgrado	Stone Mastic Asphalt (SMA)	Fibra de yute de agave
Valera Nuñez, Fiorella	Católica Santo Toribio de Mogrovejo	Perú	2018	Pregrado	Marshall	Cal hidratada más polvo de ladrillo
Meza Lorenzo, Auriola	Huánuco	Perú	2019	Pregrado	Marshall	Fibra de cabuya

Corbacho Chipana, Jorge	San Antonio Abad del Cusco	Perú	2019	Pregrado	Marshall	Fibra de Tereftalato de Polietileno Reciclado
De la Cruz Alanya, Edwin	Ricardo Palma	Perú	2019	Posgrado	Stone Mastic Asphalt (SMA)	Fibra de Basalto
Adauto Orellana, Rosario	Ricardo Palma	Perú	2019	Posgrado	Marshall	Ceniza de caña de maíz
Peña Anccasi, Juan Carlos	Ricardo Palma	Perú	2019	Posgrado	Marshall	Ceniza volantes

Fuente: Elaboración propia

Se obtuvieron 8 investigaciones, modificando el diseño de mezcla Marshall convencional, obteniendo nuevos resultados con los elementos adicionados o reemplazados. Para el diseño SMA se pudo identificar 13 investigaciones donde se modifica el diseño convencional, reemplazando la fibra celulosa por fibras residuales o naturales, que se comporta igual o mejor en las propiedades mecánicas de la mezcla.

Adauto (2019), afirma 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%”

Bejarano y Caicedo (2017), afirma que la fibra de caña de azúcar “tiende a mejorar las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla, y se presenta como una alternativa viable para la utilización de fibra natural de caña, generando beneficios técnicos, económicos y ambientales importantes en la industria vial del país”

Los dos autores realizan un diseño de mezcla Marshall adicionando la fibra de caña donde obtuvieron buenos resultados para ese diseño. Por ello esta investigación va utilizar el diseño de mezcla SMA como estabilizante la fibra y como filler la ceniza del bagazo de caña de azúcar.

2.2. Investigaciones relacionadas con el tema:

2.2.1. Investigaciones internacionales:

Amaya, Javier y Javier. (2019), publica una tesis de especialización en ingeniería de pavimentos, “la problemática en Colombia son puntualmente las que vienen de los puertos hacia el interior de país, causando daños por fatiga y ahuellamiento, los cuales requieren una gran inversión de recursos del estado, en actividades de mantenimiento y rehabilitación de las mismas, generando impactos en la movilidad. El objetivo de la investigación es analizar el desempeño mecánico

de las mezclas asfálticas tipo STONE MASTIC ASPHALT (SMA) para aplicación como capa de rodadura en pavimentos de alto volumen de tránsito en Colombia”.

Concluye, “que el análisis del diseño Marshall se determinó un porcentaje óptimo de ligante para la mezcla de 7,1% con el que se satisfacen tanto los requerimientos volumétricos como los mecánicos para este tipo de mezcla. Para la evaluación de la resistencia a la deformación plástica, de acuerdo a los lineamientos de la Especificación, en el intervalo de deformación de 105 a 120 minutos, se concluye que la mezcla cumple con lo requerido para tener un buen comportamiento en climas con temperaturas medias anuales inferiores y superiores a 24°C, en el rango óptimo de asfalto. La mezcla asfáltica compactada en la prueba de tracción indirecta (T.S.R.) indica que la mezcla asfáltica, presenta baja susceptibilidad a los daños producidos por el agua, ya que presenta un valor de T.S.R del 83,9%, el cual cumple con las especificaciones establecidas en el protocolo AAMAC PA-CR 04/2015 (min. 80%), en el valor óptimo de asfalto encontrado” (Amaya, Javier y Javier, 2019).

Los resultados obtenidos en la investigación del diseño de mezcla SMA, que el módulo dinámico es más flexible, tiene un mejor comportamiento a la fatiga y presenta mejor comportamiento plásticos en su desempeño a altos volúmenes de tráfico en comparación con un diseño convencional. Con lo obtenido se observa que la mezcla SMA ayuda a evitar el infra diseño y aumenta su desempeño mecánico del pavimento.

López (2018), publica una tesis de posgrado para optar el grado de magister en construcción, “tiene como problema principal con la baja duración de las carpetas asfálticas en estado de servicio radica en que la intervención a nivel de mantenimiento de dicha carpeta, en algunos casos puede ser casi inmediato y continuo, representando así elevados costos, cuyo objetivo es establecer una alternativa de diseño que permita incrementar la durabilidad de los hormigones

asfálticos utilizados en el Ecuador, produciendo para ello hormigones asfálticos SMA fiables, utilizando materiales locales”.

Concluye, “que al elaborar el hormigón asfáltico tipo SMA utilizando materiales locales y los resultados de los ensayos obtenidos en las 57 briquetas sometidas a los ensayos Marshall. Se estableció una alternativa viable que obtuvo los mejores resultados de ensayo, adicionalmente se realizó una comparación con una mezcla asfáltica diseñada con el método Marshall tradicional por un fabricante local, realizando una comparación económica de los posibles costos de elaboración del hormigón asfáltico tipo SMA y se lo compara con el costo de la mezcla tradicional y finalmente se evaluó el comportamiento de la propuesta de diseño de tipo SMA al compararla con las normas de SMA. Finalmente se emiten criterios sobre la durabilidad de la alternativa basados en las propiedades físico-mecánicas de las muestras ensayadas y sus resultados es estabilidad y flujo” (López, 2018).

Realizaron en la investigación diseño de mezcla con el método Marshall modificando el diseño convencional, adicionaron la fibra de yute de agave no obtuvieron buenos resultados en su comportamiento como pérdida de agregado, agrietamiento y desgaste rápido del pavimento. Dejando como lineamiento teórico para mejorar su desempeño mecánico el uso del diseño de mezcla SMA con fibra de yute que mejora considerablemente el comportamiento. Con ello nos ayuda a seguir investigando con otra fibra que sustituye a la celulosa.

Bejarano y Caicedo (2017), publica una tesis de pregrado en ingeniería civil, que “tiene como objetivo principal analizar las características y comportamiento de una mezcla asfáltica MDC-19 modificada con bagazo de caña de azúcar en diferentes dosificaciones de adición, e identificar cual porcentaje presenta una mejoría sustancial en la mezcla resultante”.

Concluye, “que la adición de bagazo de caña de azúcar al concreto asfáltico por medio de vía seca, tiende a mejorar las propiedades físicas y mecánicas de la

mezcla, y se presenta como una alternativa viable para la utilización de fibra natural de caña, generando beneficios técnicos, económicos y ambientales importantes en la industria vial del país. De acuerdo a los resultados obtenidos de los ensayos realizados a las briquetas con los distintos porcentajes de adición, se puede concluir que el contenido óptimo de bagazo de 0.5% ya que se obtuvieron resultados más eficientes con respecto a la mezcla convencional en términos de estabilidad y flujo así como un incremento importante en la resistencia a la deformación como se puede observar en la siguiente tabla” (Bejarano y Caicedo, 2017).

Su trabajo utilizaron la fibra de bagazo de caña de azúcar en un diseño de mezcla Marshall utilizando solo ensayos básicos como estabilidad, flujo, densidad y la prueba de cántabro, resultando una alternativa viable para poder mejorar las propiedades físicos y mecánicos. Nuestra investigación va más allá de lo mencionado por el autor, mejorar su diseño con mezcla asfáltica SMA con la fibra de bagazo de caña de azúcar, utilizando ensayos especiales.

Bustamante (2017), publica una tesis de posgrado para optar el grado de magister en ingeniería vial, “su propósito es adoptar otro método de diseño utilizando materiales de la mina Cantamayito que cumplan con las normas MOP. Basado en la norma UNE EN 13108-5 desde 1960, las mezclas Stone Mastic Asphalt (SMA) se utilizan para proporcionar una mayor durabilidad; constituyen un excelente esqueleto mineral basándose en su alto contenido de ligante, una alta proporción de filler y adicción de fibras celulósicas. Su objetivo principal es comparar las características de resistencia y durabilidad de las mezclas asfálticas en caliente con las Mezclas Bituminosas SMA, utilizando los materiales de la mina Catamayito”.

Concluye, “que los resultados del ensayo por tracción indirecta obtenidos en el laboratorio se demuestra que las mezclas SMA presentan 16.38% de resistencia a la rotura mayor en comparación con las mezclas convencionales, esto

permite concluir que las mezclas SMA se van a deteriorar menos debido al paso de las cargas a las que van a ser sometidas. Con el péndulo Británico que la mezcla SMA arroja resultados de fricción en la superficie de 0.63 en mezclas SMA 11 y de 0.68 en mezclas SMA 16, indicando que está dentro de una calificación “Bueno” de conformidad a lo señalado en la tabla de criterios para evaluar los valores de fricción en la superficie de pavimento, lo que significa que este tipo de mezcla tiene más alto nivel de resistencia al desplazamiento respecto a las mezclas convencionales; es decir, tiene una superficie más rugosa que permite una mayor adherencia en el contacto entre neumático y pavimento asfáltico” (Bustamante, 2017).

Su análisis comparativo entre un asfalto convencional y la mezcla bituminosa Stone Mastic Asphalt resulta, que los ensayos de péndulo Británico, compresión edométría muestra que el mejor comportamiento en fricción, adherencia y elasticidad frente a altos volúmenes de tráfico es la mezcla SMA. También en tema de costos el diseño de mezcla SMA es más costoso que la mezcla convencional en un 10.16%. El autor recomienda utilizar este diseño de mezcla al interior de su país para mejorar su desempeño y ahorrar costos en tema de mantenimiento, que ocasiona un diseño de mezcla convencional.

Jiménez (2016), publica su tesis de pregrado para optar su título profesional de ingeniero civil, “que busca obtener un pavimento asfáltico ecológicas que aplicadas al campo de la construcción de carreteras, logre solucionar problemas de tráfico pesado, su objetivo es establecer el comportamiento a la deformación del pavimento asfáltico con fibras celulósicas y pavimento asfáltico tradicional”.

Concluye, “que durante el análisis de resultados se observó que los cambios producto por la incorporación de fibras de coco en el asfalto influyeron directamente en la deformación, tal es el caso que a un porcentaje de asfalto de 5% la deformación del pavimento tradicional es 10,69, entretanto que el pavimento

con fibras posee un valor de 12,20, mientras que si se aumenta el porcentaje de asfalto a 7% el pavimento asfáltico tradicional sufre un aumento en la deformación igual a 12,75, mientras que el pavimento asfáltico con fibras disminuye su capacidad de deformarse obteniendo así un valor igual a 11,43 produciendo una reducción en la capacidad estructural del Pavimento” (Jiménez, 2016).

En la investigación modifiqué la mezcla SMA con la fibra de coco, teniendo buenos resultados en deformación y estabilización de la mezcla utilizando ensayos básicos, es una buena fibra natural que permite disminuir el escurrimiento del asfalto. Se requiere seguir mejorando el comportamiento con ensayos especializados y con mayor muestra de distribución de fibra natural y del contenido del asfalto, para mejorar su vida útil a un 30 a 40% referente a un diseño Marshall convencional.

2.2.2. Investigaciones nacionales:

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 mecánica de la mezcla (resistencia y durabilidad) y puede ser útil en el norte del Perú según el autor.

Corbacho (2019), publica su tesis de pregrado para optar su título profesional de ingeniero civil, “el polímero usado fue el polietileno tereftalato (PET), el cual se obtuvo de un centro de acopio de botellas de plástico reciclado donde se realiza el picado mediante una máquina trituradora. Esta iniciativa de usar plástico PET reciclado recae en el problema medioambiental que provoca, y a pesar de que existen procesos de reciclaje, este tratamiento es insuficiente para poder disminuir la contaminación producida por desechos plásticos. Se realizó el diseño mediante el Método Marshall para obtener el contenido óptimo de asfalto de una mezcla asfáltica convencional y luego se procedió a modificar la mezcla asfáltica con las fibras PET por sustitución de agregado fino en vía seca con el fin de obtener el contenido óptimo de fibras PET. Su objetivo principal Analizar la

estabilidad Marshall y la deformación permanente mediante el ensayo de rueda cargada de Hamburgo de una mezcla asfáltica modificada en caliente por sustitución parcial de agregado fino por fibras de tereftalato de polietileno reciclado”.

Concluye, “que se encontró que el porcentaje óptimo de asfalto de mezcla asfáltica modificada es 6.15% y de fibras PET es 1.2%, obteniendo una estabilidad de 856.3 kg y un flujo de 14.7 (0.25 mm), cumpliendo con los requerimientos de la norma MTC E-504 del Manual de Carreteras - Especificaciones Técnicas Generales para Construcción – EG-2013. Cabe indicar 116 que la modificación de mezcla asfáltica al ser una sustitución parcial de agregado fino, no varía el contenido óptimo de asfalto determinado para mezcla asfáltica convencional” (Corbacho, 2019).

El autor mejoró sus propiedades mecánicas del diseño Marshall convencional añadiendo fibras de tereftalato de polietileno reciclado (PET), presentó un incremento de la resistencia a la susceptibilidad a la deformación permanente en 24% respecto a la mezcla asfáltica convencional. Se requiere realizar estudios más especializados para garantizar su producción de esta mezcla como viga fatiga, tracción indirecta y su análisis de costo en producción y mantenimiento en obra

2.3. Estructura teórica y científica que sustenta el estudio:

2.3.1. Pavimento Asfáltico:

El pavimento está formado por varias capas traslapado horizontalmente, se diseña y construye con materiales idóneo y apropiado de acuerdo al uso del pavimento. Debajo de estas estructuras se encuentra la subrasante de la carretera, producto de un movimiento de tierras en el proceso de creación de la vía y que debe de resistir los esfuerzos del trafico constante (pesado, medio y bajo), en el transcurso de su vida útil que fue diseñado la estructura del pavimento. (Montejo, 2006, pág. 1).

Los esfuerzos en el pavimento transmitidos por el tráfico van disminuyendo conforme a la su profundidad, por eso las capas de mayor soporte de carga deberán de estar en los primeros espesores y las de menores calidad al último, por ser materiales que se encuentran en la naturaleza y son más económicos. La estratigrafía de la estructura del pavimento se realiza con fines de reducir costos y que pueda reducir esfuerzos a la última capa. La resistencia de los estratos depende del tipo de material y del proceso constructivo que se utiliza a la hora de construir la vía, ya que si no se obtiene el porcentaje de humedad óptimo y la compactación apropiada, se generara deformaciones a corto plazo producto del tráfico

2.3.1.1. Estructura del Pavimento Asfáltico:

El componente “estructural que se apoya sobre el terreno de fundación y que está conformado por capas de materiales de diferentes calidades y espesores, que obedecen a un diseño estructural, se denomina pavimento. La estructura del pavimento está destinada a soportar las cargas provenientes del tráfico” (Minaya y Ordoñez, 2006, pág. 1).

El pavimento flexible está constituido por una carpeta asfáltica, una capa de base y una de sub base, que están sobre la sub rasante como se muestra en la figura 2. Donde también se puede cambiar el diseño de acuerdo a la particularidad del proyecto y sus diferentes condiciones.

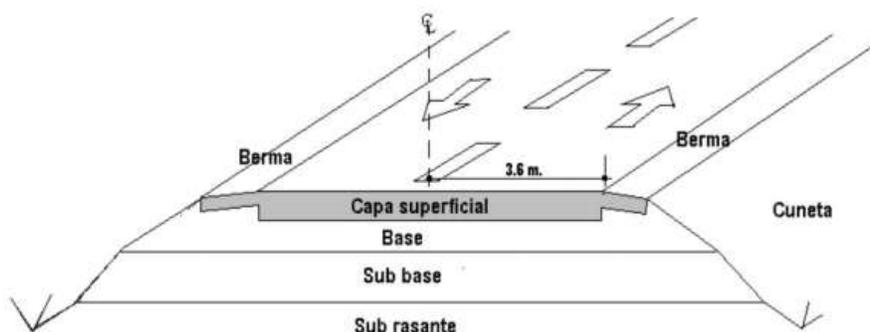


Figura 2: Estructura típica de pavimentos asfálticos

Fuente: Escobar, Vasquez, y Gaviria, 2012.

- **Carpeta Asfáltica:**

“La carpeta asfáltica o capa de rodamiento proporciona una superficie uniforme y estable al tránsito, de textura y color adecuado, que debe resistir los efectos abrasivos provenientes del tránsito y del medio ambiente” (Minaya y Ordoñez, 2006, pág. 2).

También, “es la parte superior del pavimento, que puede ser de tipo bituminoso (flexible) o de concreto de cemento portland (rígido) o de adoquines, cuya función es sostener directamente el tránsito” (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2014, pág. 25).

- **Base:**

Es la capa que está encima de la sub base. “La función de esta capa es transmitir los esfuerzos del tráfico, a la sub base y subrasante, la calidad de los agregados son muy exigentes, está conformada por grava chancada, compactada al 100% de la máxima densidad seca” (Minaya y Ordoñez, 2006, pág. 2).

También, “es la capa inferior de la carpeta asfáltica, tiene como principal función de sostener, distribuir y transmitir las cargas del tráfico, esta capa será de material granular drenante ($CBR \geq 80\%$) o será tratada con asfalto, cal o cemento” (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2014, pág. 25).

- **Subbase:**

La subbase, es una capa que no es indispensable, que de acuerdo al diseño puede o no colocarse. Esta encima de la subrasante o del terreno de fundación, la especificación técnica de los materiales no de menos calidad y disminuye su rigurosidad, “la razón de esto es que los esfuerzos verticales que se transmiten a través de las capas de pavimentos son mayores en la superficie y van disminuyendo a medida que se profundizan” (Minaya y Ordoñez, 2006, pág. 2)

También, “es una capa que soporta a la base y a la carpeta asfáltica, además se utiliza como capa de drenaje y controlador de capilaridad del agua, puede ser de material granular ($\text{CBR} \geq 40\%$) o tratada (asfalto, cal o cemento)” (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2014, pág. 25).

- **Terreno de fundación:**

“El terreno de fundación puede estar conformado por un terraplén (caso de rellenos) o terreno natural en el caso de cortes, para ambos casos, la cota geométrica superior se denomina subrasante” (Minaya & Ordoñez, 2006, pág. 2)

2.3.2. Materiales Asfálticos

2.3.2.1. Cemento asfáltico:

El cemento asfáltico se produce por la destilación al vapor de los residuos más pesados del proceso de fraccionamiento, continuando hasta adquirir la estabilidad deseada. “Se aplica el vapor en el refinado para que los volátiles pesados puedan ser separados sin aumentar demasiado la temperatura, porque a temperaturas excesivamente altas reducen la ductilidad, aumentan la fragilidad y producen desdoblamiento, obteniendo un producto menos homogéneo” (Montejo, 2006, pág. 44)

El cemento asfáltico es elaborada comercialmente, obteniendo 5 rangos de consistencia, de acuerdo a su penetración y su uso en el pavimento, se clasifica cada rango de la siguiente manera:

- AC 40-50: Cemento asfáltico con penetración entre 40 y 50 décimas de milímetro.
- AC 60-70: Cemento asfáltico con penetración entre 60 y 70 décimas de milímetro.
- AC 85-100: Cemento asfáltico con penetración entre 85 Y 100 décimas de milímetro

- AC 120-150: Cemento asfáltico con penetración entre 120 Y 150 décimas de milímetro
- AC 200-300: Cemento asfáltico con penetración entre 200 Y 300 décimas de milímetro

2.3.2.2. Comportamiento mecánico del cemento asfáltico:

La naturaleza del asfalto es viscoelástica, donde su comportamiento depende de la temperatura y el tiempo donde se aplica los. En la figura 3 se muestra que “el asfalto a altas temperaturas tiene menor rigidez durante la temperatura de mezcla, también a medida que la temperatura descende el asfalto se vuelve más rígido, a temperaturas muy bajas el asfalto puede agrietarse porque se vuelve frágil y quebradizo” (Minaya y Ordoñez, 2006, pág. 50)

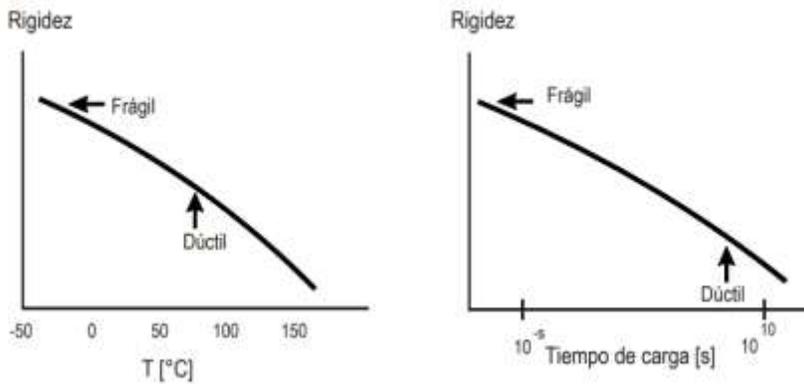


Figura 3: comportamiento real del asfalto

Fuente: Minaya y Ordoñez, 2006, pág. 50.

2.3.3. Mezcla asfáltica

También reciben el nombre de aglomerados, “están formadas por una combinación de agregados y un ligante hidrocarbonato, para que los agregados queden cubiertos por una película continua del ligante, se fabrican en plantas fijas o móviles, se transportan a la obra, se extienden y se compactan” (Kraemer, 2009).

Las mezclas asfálticas “se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Sin olvidar que se utilizan en las capas inferiores de los pavimentos para tráficos pesados intensos” (Kraemer, 2009).

También están conformadas por un 90% de agregados gruesos y finos, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico, “esos componentes son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad afecta al conjunto, el asfalto y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen en la calidad de la mezcla asfáltica” (Kraemer, 2009).

En la figura 4, se muestra el esquema de las clases y tipos de mezclas asfálticas, donde dependen de la temperatura y la compactación (mezclas en caliente, mezclas tibias, mezclas frías), también dependen de sus granulometrías.

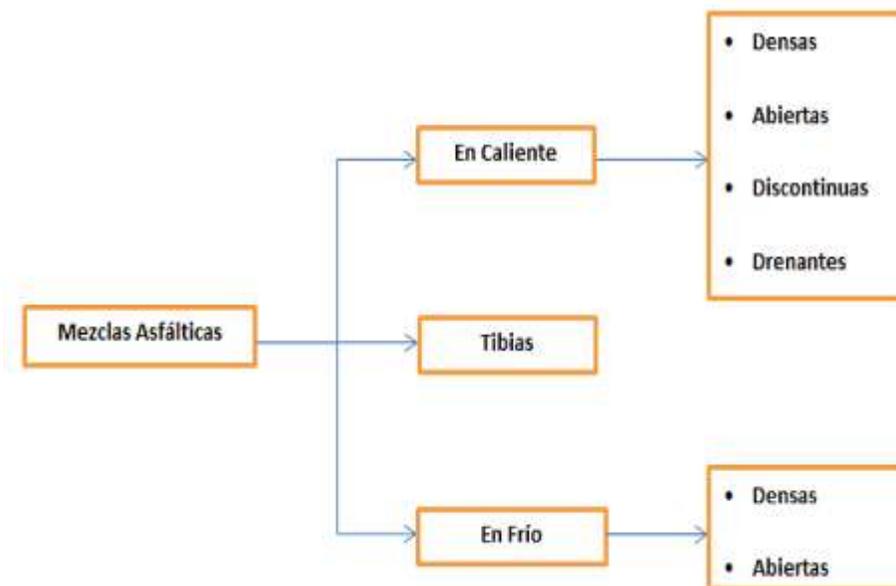


Figura 4: Esquema de la tipología de las mezclas asfálticas

Fuente: Preciado & Sierra, 2013.

2.3.3.1. Tipos de mezclas asfálticas:

a. Mezclas asfálticas en caliente:

Son las elaboradas en caliente, utilizando cemento asfáltico y materiales pétreos, en una planta mezcladora estacionaria o móvil, provista del equipo necesario para calentar los componentes de la mezcla. Las mezclas asfálticas en caliente se clasifican a su vez en:

Mezcla asfáltica de granulometría densa: Es la mezcla en caliente, uniforme y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos bien gradados, con tamaño nominal entre treinta y siete coma cinco (37,5) milímetros (1 ½ in) y nueve coma cinco (9,5) milímetros (3/8 in). Normalmente se utiliza en la construcción de carpetas asfálticas de pavimentos nuevos en los que se requiere una alta resistencia estructural, o en renivelaciones y refuerzo de pavimentos existentes. (Preciado y Sierra, 2013)

Mezcla asfáltica de granulometría abierta: es una mezcla en caliente, uniforme, homogénea y con un alto porcentaje de vacíos, fabricado con cemento asfáltico y agregados con una granulometría uniforme, esta mezcla se utiliza para la carpeta de rodadura que no cumple una función estructural y esta sobre una capa de granulometría densa, “permite que las aguas de lluvia se desplaza por las llantas, ocupando los vacíos de la carpeta, incrementando la fricción de la llanta con la carpeta asfáltica y reduciendo el hidropelaje, también mejora la visibilidad de la señalización en carreteras” (Preciado y Sierra, 2013).

Mezcla asfáltica de granulometría discontinua: es una mezcla en caliente, uniforme y homogénea, fabricado con cemento asfáltico y agregados con granulometría discontinua, esta mezcla se utiliza para la carpeta asfáltica, también se usa en vías de alto tránsito, se usa para mejorar las condiciones de transitabilidad de la carpeta de rodadura en comparación de una carpeta convencional, al obtener más macrotextura evita q el agua de lluvia forme una lámina de agua con el

pavimento, por eso se eleva la fricción con las llantas y casi no existe el fenómeno del hidroplaneo, “reduce el agua que se proyecta sobre los vehículos adyacentes; se mejora la visibilidad de la señalización horizontal de la vía y se reduce el ruido hacia el entorno por la fricción entre las llantas y la superficie de rodadura” (Preciado & Sierra, 2013)

Mezcla asfáltica drenante: es una mezcla que se caracteriza que posee un elevado porcentaje de vacío en la mezcla con 16 a 25% o más, es usada como carpeta asfáltica y también para evitar las fisuras, “estos huecos permiten el paso del agua a través de la misma, favoreciendo su eliminación en la superficie del camino, y presentando una alta macrotextura y microtextura, ésta última como consecuencia de la calidad de los agregados usados” (Preciado & Sierra, 2013).

2.3.3.2. Asfaltos modificados:

Se presentan casos en los que las características de las mezclas asfálticas obtenidas con los cementos asfálticos convencionales no son capaces de resistir a la acción conjunta del tránsito y del clima, por lo que resulta necesaria la utilización de ligantes modificados que presenten mejores propiedades reológicas, un mayor grado de adherencia, mayor resistencia al envejecimiento y menor susceptibilidad térmica.

Las mezclas asfálticas elaboradas con estos ligantes modificados “presentan altos valores de stiffness a temperaturas altas de servicio para disminuir el ahuellamiento, bajos stiffness a temperaturas bajas, reduce el riesgo de aparición prematura de fisuras. También el grado de afinidad ligante-agregado en presencia de agua se mejora sustancialmente” (Reyes, 2003).

Algunas de estas propiedades pueden mejorarse mediante el empleo de ligantes más duros, pero esto reduciría su flexibilidad a temperatura ambiente y proveerá al ligante de un mayor grado de fragilidad a temperaturas bajas.

Para mejorar las propiedades citadas sin producir efectos negativos secundarios, se están usando a escala mundial los cementos asfálticos modificados con polímeros. Con la utilización de los modificadores y aditivos, se puede lograr:

- Mejorar el stiffness del cemento asfáltico a temperaturas altas de servicio, minimizando el riesgo de ahuellamiento.
- Obtener mezclas más flexibles a temperaturas bajas de servicio para minimizar la aparición de fisuras asociadas a los cambios térmicos.
- Mejorar la resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas.
- Mejorar la afinidad ligante-agregado pétreo, con el fin de reducir el riesgo de stripping o pérdida de adherencia.
- Mejorar la resistencia a la abrasión de las mezclas asfálticas.
- Rejuvenecer el cemento asfáltico.
- Minimizar los problemas durante el proceso de colocación y compactación de la mezcla asfáltica.
- Mejorar las características elásticas del cemento asfáltico.
- Permitir un mayor espesor de la película de ligante alrededor de las partículas del agregado, con el propósito de aumentar la durabilidad de la mezcla.
- Reducir la probabilidad de exudación del cemento asfáltico.
- Disminuir los espesores de las estructura del pavimento.
- Mejorar el comportamiento general de toda la estructura del pavimento.

Una mezcla asfáltica ideal debe tener las siguientes características:

- Baja rigidez o viscosidad a las temperaturas normales de manejo en planta y colocación en obra.
- Alta rigidez a las temperaturas altas de servicio para reducir el ahuellamiento.
- Baja rigidez y buenas características elásticas a temperaturas bajas de servicio para reducir el riesgo de la aparición de fisuras por cambios de temperatura.

2.3.4. Diseño de mezclas asfálticas S.M.A.

Stone Mastic Asphalt (SMA), pertenece a la familia de las mezclas asfálticas en caliente o Hot Mix Asphalt (HMA), siendo considerada una mezcla gap-graded (granulometría semi-abierta o discontinua), que son semejantes a las mezclas densas por tener capas impermeabilizantes a la estructura del pavimento, cuando se tiene una buena compactación. Sin embargo, no son del todo densas por tener diferentes granulometrías de sus agregados y diferentes propiedades en cada uno de ellos brinda.

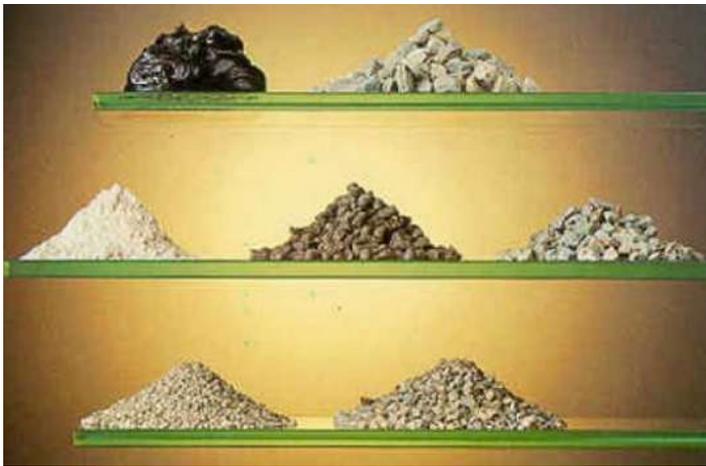


Figura 5: componente de la mezcla Stone Mastic Asphalt

Composición de las mezclas SMA:

La selección de materiales para este tipo de mezcla se realiza con sumo cuidado. El agregado grueso tiene que ser durable y tiene que tener forma cubica (máximo 20% de agregado alargado o achatado). Deben tener el 100% de partículas con una o más caras fracturadas.

Los agregados deben tener buena forma angular para que puedan tener buena adherencia con los demás materiales a combinar, también tiene que tener alto valor al deslizamiento, para poder tener buena resistencia al resbalón en la parte superior de las mezclas.

Mientras que el agregado fino tiene que presentar por lo menos el 50% de partículas fracturadas mas no se puede utilizar arena natural. La arena, filler y fibra forman una mezcla rígida y esto es esencial para contrarrestar la deformación permanente o Rutting. El filler y fibra por su lado actúan en el asfalto reduciendo la cantidad de escurrimiento o Draindown durante la construcción. La adición de estos materiales incrementa la cantidad de asfalto usado en la mezcla y mejora la durabilidad de la carpeta asfáltica. El filler puede ser de piedra caliza y cal hidratada.

La combinación de asfalto, filler, arena y fibra, se denomina Mastic o Matriz, el cual es parte fundamental de las mezclas SMA, porque le da consistencia a la misma. El equilibrio que se da entre el Mastic y el agregado es importante ya que cualquier exceso por parte de uno de estos componentes podría perjudicar la estructura, es por ello que al momento de diseñar se toma en cuenta factores como: la buena dosificación del asfalto la buena gradación de los agregados y la óptima adición de filler y fibra. Los porcentaje que se utilizan para el diseño de esta mezcla, son basadas en las especificaciones Alemanas ya que dentro de todas, es la que mejor aceptabilidad tiene, en la colocación de carpetas asfálticas.

2.3.5. Mezclas asfálticas con la tecnología Stone Mastic Asphalt (S.M.A.):

Según Minaya y Ordoñez, (2006), las mezclas Stone Mastic Asphalt “son el resultado de la combinación de una estructura granular gruesa y un mastic de asfalto, filler y fibra. La mezcla es de textura abierta y estructura interna densa con un volumen de vacíos de aire entre 2 y 4%”.

“Las mezclas Stone Mastic Asphalt también conocidas como Stone Matrix Asphalt tienen origen alemán. Bajo la denominación de Splittmastixasphalt, a finales de los años 60, se construyen las primeras carreteras con este tipo de mezclas” (Minaya y Ordoñez, 2006).

En Europa, las mezclas S.M.A. “vienen siendo usadas en las capas superiores por más de 30 años, para reducir las deformaciones permanentes producidas por tráfico pesado. Las gradaciones de los agregados y el óptimo contenido de asfalto son considerablemente diferentes que las mezclas densas” (Minaya y Ordoñez, 2006).

De acuerdo a la figura 6, el Stone Mastic Asphalt se forma el “contacto piedra-piedra debido a su estructura granular, eso no ocurre con las mezclas asfálticas densas que están formadas por agregados dentro de una matriz arenosa, las cargas de tráfico en S.M.A. son soportadas por las partículas de agregado grueso” (Minaya y Ordoñez, 2006).



Figura 6: Composición de una mezcla SMA

Fuente: Sanchez, 2009

2.3.6. Comportamiento de mezclas asfáltica SMA.

El principio de las mezclas S.M.A. es la estructura granular, donde se resalta el contacto piedra-piedra, por ello tiene alta resistencia al cortante y baja deformación permanente, la granulometría discontinua es completada con un mastic de finos, filler, asfalto y fibra. “Por su constitución granulométrica se considera un mayor porcentaje de ligante asfáltico en la mezcla, entre 6 a 7%, esto

resulta en una mezcla con mayor durabilidad. La figura N°7 muestra la diferencia entre las mezclas Superpave y SMA” (Minaya y Ordoñez, 2006, pág. 198).



Figura 7: Comparación entre una mezcla SMA y un Superpave

Fuente: Minaya y Ordoñez, 2006

SMA contiene vacíos entre 2 a 4% por volumen, este bajo porcentaje de vacíos proporciona una excelente macro textura y baja permeabilidad. El aditivo estabilizador de la mezcla puede ser fibra de origen orgánico o mineral o polímero. Ellos recubren el agregado y evitan que el ligante se escurra, asegurando una mezcla homogénea.

Según Minaya y Ordoñez (2006), las mezclas SMA “tiene un alto costo inicial debido al mayor porcentaje de asfalto y el uso de agregados más resistente, este costo puede ser compensado con el incremento de la resistencia a las deformaciones permanentes bajo cargas de tráfico medio a alto”. Además, aumenta la durabilidad y se previene el agrietamiento por fatiga.

2.3.7. Componentes de la mezcla asfáltica SMA:

SMA es una mezcla de alta calidad de sus materiales. Agregados cúbicos, baja abrasión, piedra chancada y arena preparada porque la mezcla se beneficia más del desarrollo de la resistencia del esqueleto de agregado piedra-piedra. El 100% de los agregados deben tener una o más caras fracturadas. No se permite el uso de arenas naturales.

De acuerdo a la tabla 2, La arenas chancada, filler mineral, y aditivos (fibras y/o polímeros) “rigidizan la matriz por ser propiedad de esta mezcla, el filler mineral y aditivos reducen la cantidad de asfalto que drena hacia abajo durante la construcción, incrementando la cantidad de asfalto usado en la mezcla, mejorando así su durabilidad” (Minaya y Ordoñez, 2006).

Tabla 2:
Materiales para mezclas SMA.

Capa	Material	Trafico Medio	Trafico Alto
Superficial e intermedia / ligante	Agregado	<ul style="list-style-type: none"> • Grava chancada • Piedra chancada • Arena chancada • Filler mineral 	
	Ligante Asfáltico	<ul style="list-style-type: none"> • Asfalto modificado • El asfalto no modificado puede ser usado para trafico bajo 	<ul style="list-style-type: none"> • Asfalto modificado • Asfalto no modificado dependiendo de la experiencia laboral
	Otros	<ul style="list-style-type: none"> • Fibras • Antistrip en la cantidad definida en laboratorio 	

Fuente: Minaya y Ordoñez, 2006.

2.3.7.1. Agregado grueso:

En cuanto a la fabricación de los pavimentos asfálticos SMA, los agregados gruesos deben cumplir con las siguientes requisitos:

Tabla 3:
Requisitos de calidad para Agregado Grueso SMA

Ensayo	Método	Especificación
Abrasión Los Ángeles, % perdida	AASHTO T 96	30* máx.
Chatas y Alargadas, %		20 máx.
3 a 1	ASTM D 4791	5 máx.
5 a 1		
Absorción, %	AASHTO T 85	2 máx.
Durabilidad (5 ciclos), %		15 máx.
Sulfato de Sodio	AASHTO T 104	20 máx.
Sulfato de Magnesio		
Caras fracturadas, %		100 min.
Una cara	ASTM D 5821	90 min
Dos caras		

Fuente: Minaya y Ordoñez, 2006

2.3.7.2. Agregado fino

Para que el agregado fino cumpla como material de elaboración del pavimento SMA, debe de cumplir con las siguientes especificaciones.

Tabla 4:
Requisitos de calidad para Agregado Fino SMA

Ensayo	Método	Especificación
Durabilidad, perdida %		
Sulfato de Sodio	AASHTO T 104	15 máx.
Sulfato de Magnesio		20 máx.
Angularidad, %	AASHTO TP33 (Met. A)	45 min.
Limite Liquido, %	AASHTO T 89	25 max.
Índice de Plasticidad	AASHTO T 90	N.P.

Fuente: Minaya y Ordoñez, 2006

2.3.7.3. Filler:

Se define como material que pasa por lo menos un 65% por la malla N° 200, cumpliendo como relleno de vacíos del agregado grueso, aporta a la consistencia, cambia la trabajabilidad, resiste al agua y disminuye el envejecimiento. Al añadir el filler incrementa la viscosidad, también actúa como ligante asfáltico formando una lámina que cubre los agregados.

Si el porcentaje del material que pasa por la malla N°200 aumenta, entonces reduce los vacíos del esqueleto mineral, mejora la gradación y la trabajabilidad de la mezcla. “Por encima de este nivel, cuanto mayor sea el porcentaje que pasa la malla N° 200, los finos comenzarán a perjudicar la estabilidad del esqueleto mineral, disminuyendo los contactos entre las partículas gruesas, alterando la capacidad de compactación” (Minaya y Ordóñez, 2006).

a. Filler cal hidratada:

La cal o cal viva es el compuesto químico con que comúnmente se le llama al óxido de calcio. Se obtiene como resultado de la calcinación de la roca caliza. Se da la posibilidad de agregar agua a la cal, obteniendo así un compuesto químico hidratado al cual se le denomina cal apagada, hidróxido de calcio o cal hidratada.

La cal utilizada es un hidróxido de calcio de alta pureza, es comúnmente utilizada en procesos de sectores como: industria farmacéutica, química, alimenticia, petrolera, tratamiento de aguas y refinación.

Propiedades físicas:

- Color blanco o ligeramente amarillento
- Sin olor
- Densidad: 1.117g/ml
- pH: 11 – 12.5 a 25°C
- Punto de fusión 2570°C
- Punto de ebullición: 2850°C

Tabla 5:
Propiedades químicas

Características químicas (ASTM C-25)		
Hidróxido de Calcio	Ca(OH) ₂	83% min.
Oxido de Magnesio	MgO	0.7% max
Dioxido de Silicio	SiO ₂	1% max
Oxido de Hierro + Aluminio	Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃	0.5% max
Insolubles	HCl	1.5% max
Características Físicas (ASTM C-25)		
Humedad	H ₂ O	1% max
Características Físicas (ASTM C-110)		
Granulometría (% que pasa)	Malla 200	85% min

Fuente: Caltek.

b. Filler ceniza de bagazo de caña de azúcar:

Las cenizas del bagazo de caña de azúcar presentan el efecto puzolánico, el cual significa que el material tiene la capacidad de reducir el calor de hidratación del cemento, de inhibir la reacción álcali-agregada, elevar la resistencia al ataque por cloruros y sulfatos, o sea, resumiendo, la puzolana es una adición que eleva la durabilidad del concreto con relación a muchos agentes agresivos. De este modo, el estudio del aprovechamiento de este residuo de la industria agrícola es de gran importancia para la industria de la construcción civil. (Ribeiro, 2011)

Tabla 6:

Composición química de la ceniza de bagazo de caña de azúcar

Nombre químico	Elementos químicos	% CBCA
Dioxido de silicio	SiO ₂	84.86%
Oxido de calcio	CaO	2.96%
Oxido de magnesio	MgO	2.54%
Trioxido de dihierro	Fe ₂ O ₃	3.83%

Trióxido de azufre	SO ₃	0.38%
Monóxido de dipotasio	K ₂ O	1.38%
Trióxido de dialuminio	Al ₂ O ₃	1.91%
Cloro	Cl	-
Monóxido de disodio	Na ₂ O	0.47%
Pentóxido de difósforo	P ₂ O ₅	0.38%
Dióxido de titanio	TiO ₂	0.75%
Dióxido de zirconio	ZrO ₂	0.12%
Oxido de manganeso	MnO	0.19%
trióxido de dicromo	Cr ₂ O ₃	0.05%
Óxido de estroncio	SrO	0.03%

Fuente: Berenguer, 2017

2.3.7.4. Asfalto:

ASTM lo define como un “material cementante, de color oscuro y de consistencia variable, cuya rigidez depende de la temperatura. A temperatura ambiente el asfalto es sólido a semisólido, cuando su temperatura aumenta se vuelve líquido, esta condición permite que los agregados sean cubiertos completamente” (Minaya y Ordoñez, 2006).

El asfalto usado en pavimentación, generalmente “llamado cemento asfáltico, a altas temperaturas (135 °C) es poco rígido, condición que permite que se adhiera fácilmente a las partículas del agregado y, por lo tanto, es un excelente cemento que une los agregados en mezclas en caliente” (Minaya y Ordoñez, 2006).

2.3.7.5. Agente estabilizante:

Según Minaya y Ordoñez (2006) “Uno de los principales problemas observados en las mezclas SMA es el escurrimiento del cemento asfáltico de la piedra, ocasionando los fat spot o manchas en la superficie del pavimento”.

La mezcla S.M.A. se diferencia por su elevada cantidad de agregado grueso que constituye un esqueleto de granulometría discontinua. “Los vacíos de la matriz estructural se llenan con mastic altamente viscoso, la rigidez se obtiene incorporando aditivo estabilizante, los aditivos estabilizantes como fibras, caucho, polímero o combinación de estos materiales, son incorporados para rigidizar el mastic a altas temperaturas” (Minaya y Ordóñez, 2006).

Para Sanchez (2009):

- a. Se incluye para minimizar el escurrimiento del asfalto en la mezcla y contribuir en la adecuada consistencia del mortero.
- b. Está constituido por fibras de celulosa o de tipo mineral.
- c. La cantidad en la cual se debe incorporar es, como mínimo, 0.3% respecto del peso de la mezcla.

Tabla 7:

Requisitos de calidad de las Fibras de Celulosa.

Propiedad	Requisito
Longitud de la fibra	6 mm máximo
Pasa tamiz #20 (%)	75 – 95
Pasa tamiz #40 (%)	55 – 75
Pasa tamiz #140 (%)	20 – 40
Contenido de ceniza (%)	13 – 23 no volátiles
PH	6.5 – 8.5
Absorción de aceite	4 a 6 veces el peso de la fibra
Humedad	< 5
Longitud de la fibra	6 mm máximo
Diámetro de la fibra	0.005 mm máximo
Material no fibroso	
Pasa tamiz #60 (%)	95 mínimo
Pasa tamiz #230 (%)	65 mínimo

Fuente: Sanchez, 2009

a. Agente estabilizante de fibra de celulosa

“Las fibras de celulosa son un producto de origen vegetal y renovable. La principal fuente de celulosa es la madera, aunque también se obtiene de otras especies vegetales (paja, cereales, restos de podas, plantas herbáceas). Se trata de una sustancia con una superficie específica elevadísima y una densidad aparente muy pequeña (entre 30 y 300 gr/l, según su procesamiento)”. (ASEFMA, 2013).

“La molécula de celulosa presenta una inercia química muy alta, o sea, es poco propensa a reaccionar con otras sustancias, por lo que no altera las propiedades del betún. La compatibilidad con el betún es muy buena, por lo que en condiciones adecuadas la envuelta de las fibras por éste es fácil y completa” (ASEFMA, 2013).

“Por su estructura filamentosa ofrece una elevada flexibilidad y como tiene cierta elasticidad según el eje de la fibra, es un producto que resiste bien los enormes esfuerzos que se producen durante el amasado, lo que contribuye a que no se rompa excesivamente. Finalmente, hay que señalar que en el proceso productivo de las fibras de celulosa puede conseguirse una superficie irregular que aumenta la superficie específica y facilita el entrelazado de las hebras para la formación de una malla tridimensional” (ASEFMA, 2013).

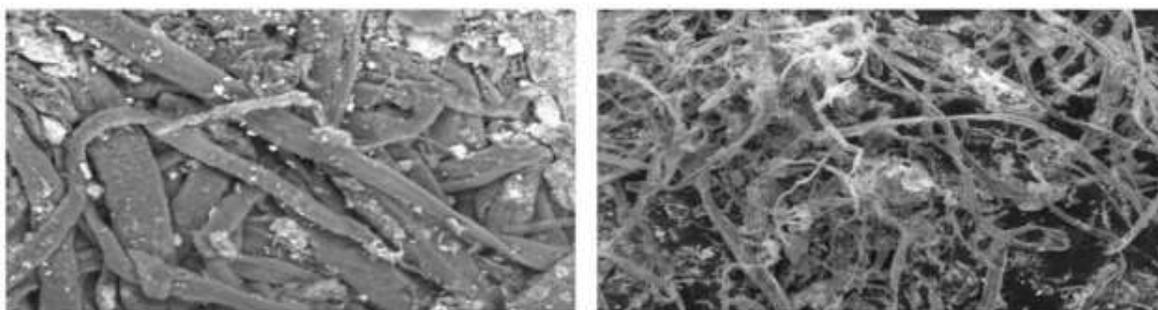


Figura 8: Fibra de celulosa recubierta con betún

Fuente: ASEFMA, 2013.

Las fibras de celulosa “vienen utilizándose desde hace décadas como estabilizante, para prevenir el escurrimiento del betún y su reparto uniforme, con

el fin de conseguir la formación de una película gruesa y homogénea alrededor de los áridos en mezclas con dotaciones de ligante” (ASEFMA, 2013).

Tabla 8:

Propiedades físicas de la Fibra de Celulosa

Propiedades	Especificación
<u>Análisis por tamizado</u>	
Método A: Análisis por Tamiz Alpina	
Longitud de fibra (max)	6 mm
Pasa tamiz N°100	70 ± 10%
Método B: análisis por tamiz cuadrado	
Longitud de fibra (máx.)	6mm
Pasa tamiz N°20	80 ± 10%
Pasa tamiz N°40	65 ± 10%
Pasa tamiz N°140	30 ± 10%
Contenido de cenizas	18% (±5%) no volátiles
PH	7.5% (±1)
Absorción de petróleo	5% (±10) vez por peso de fibra
Contenido de humedad	<5% por peso

Fuente: Minaya y Ordóñez, 2006

b. Agente estabilizante de bagazo de caña de azúcar:

“Es el nombre común de esta especie de herbáceas, vivaces, de tallo leñoso de un género (Saccharum) de la familia de las gramíneas (Gramineae), originaria de la Melanesia y cuya especie fundamental es Saccharum officinarum” (Subirós, 2000).

La caña de azúcar se cultiva mucho en países tropicales y subtropicales de todo el mundo por el azúcar que contiene en los tallos, formados por numerosos nudos. Es un pasto gigante emparentado con el sorgo y el maíz. La caña alcanza entre 3 y 6 m de altura y entre 2 y 5 cm de diámetro. El sistema radicular lo compone un robusto rizoma subterráneo; El tallo acumula un jugo rico en sacarosa, compuesto que al ser extraído y cristalizado en el ingenio forma el azúcar. La

sacarosa es sintetizada por la caña gracias a la energía tomada del sol durante la fotosíntesis con hojas que llegan a alcanzar de dos a cuatro metros de longitud. En su parte superior encontramos la panocha, que mide unos 30 cm. de largo.



Figura 9: Planta de Caña de Azúcar

Taxonomía: Según Subirós (2000), “En la actualidad se acepta como clasificación taxonómica de la caña de azúcar” el siguiente esquema:

Reino: Plantae

Subreino: Cormobionta

División: Magnoliophytina

Clase: Liliatae

Orden: Poale

Familia: Poaceae (Gramineae)

Tribu: Andropogonoidea

Género: Saccharum

Especie:

- Saccharum officinarum L.
- Saccharum robustum Jesw.
- Saccharum spontaneum L.
- Saccharum barberi Jesw.
- Saccharum sinense Jesw.

Constituyentes de la caña de azúcar: Según Subirós (2000), “El tronco de la caña de azúcar está compuesto por una parte sólida llamada fibra y una parte líquida, el jugo, que contiene agua y sacarosa. En ambas partes también se encuentran otras sustancias en cantidades muy pequeñas”. La relación de los componentes se diferencia de acuerdo a su variedad de la caña, edad, madurez, clima, suelo, método de cultivo, abonos, lluvias, riegos, etc. Sin embargo, unos valores de referencia general pueden ser:

- ✓ Agua 73 - 76 %
- ✓ sacarosa 08 - 15 %
- ✓ fibra 11 - 16 %

La sacarosa del jugo es cristalizada en el proceso como azúcar y la fibra constituye el bagazo una vez molida la caña.

Bagazo de caña de azúcar: se produce como consecuencia de la fabricación de azúcar y constituye un subproducto de esta producción. “Es un combustible natural para producir vapor en las fábricas azucareras, es un material fibroso, heterogéneo en cuanto a su composición granulométrica y estructural, que presenta relativamente baja densidad y un alto contenido de humedad” (Subirós, 2000).

Composición del bagazo de caña de azúcar: Según Subirós (2000), “Cuando el bagazo sale del molino posee aproximadamente la siguiente composición”:

- Humedad (50%).
- Sólidos solubles (5%)
- Sólidos insolubles o fibra cruda (45%)

Además, su composición química es la siguiente:

- Carbono: 47 %
- Hidrógeno: 6,5 %
- Oxígeno: 44 %
- Cenizas: 2,5 %

Composición de la fibra de caña de azúcar: Según Subirós (2000), “De forma general, el bagazo está constituido por”:

- Holocelulosa (75%)
- Celulosa (50%)
 - Celulosa Alfa (37%)
 - Celulosas Beta y Ganma (13%)
- Hemicelulosa (25%)
- Lignina (20%)
- Otros componentes (5%).

2.3.7.6. Estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica:

El método original de Marshall, sólo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1”), o menor. Este método sirve para la medición de la resistencia al flujo plástico de cuerpos cilíndricos de mezcla asfáltica para pavimentos, con un diámetro de 102 mm, aplicando la carga en la dirección perpendicular al eje cilíndrico utilizando el equipo Marshall. (ASTM D6927-05)

Con el ensayo de estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica se obtiene el valor de carga máxima en Kg o Newton que soporta la mezcla para resistir desplazamientos y deformaciones. Este valor expresa la resistencia estructural de la mezcla compactada y depende del contenido de asfalto, la composición granulométrica y del tipo de agregado. Con este ensayo se evalúa los componentes de la mezcla asfáltica en forma individual y su interacción cuando están mezclados. La estabilidad de la mezcla depende de la fricción y cohesión intema. La fricción interna tiene relación con las características geométricas y textura del agregado. La cohesión proviene de la capacidad del ligante para mantener unidas as partículas. (Sanchez, 2014)

Se entiende como flujo a la deformación vertical total del espécimen sometido a la carga máxima, en este punto la carga empieza a decrecer. Este valor nos indica la resistencia que ofrecerá la carpeta asfáltica al deformarse bajo la acción de las cargas de los vehículos. Cuando el flujo es mayor a 0.16 pulgadas puede indicar que la mezcla es inestable bajo cargas de los vehículos. (Sanchez, 2014)

2.3.8. Desempeño mecánico de la mezcla asfáltica SMA

Los cuatro principales mecanismos de daño de mezclas asfálticas en servicio, reportados en la literatura de referencia y que se deben tener en cuenta en el diseño del pavimento, son el ahuellamiento, los agrietamientos por fatiga, el daño por humedad y el envejecimiento.

2.3.8.1. Deformación permanente en mezclas asfálticas:

Según Rondón y Reyes (2015). El fenómeno de ahuellamiento “es uno de los principales mecanismos de daño de capas asfálticas en estructuras de pavimento flexible. Este fenómeno puede ser definido como la deformación vertical permanente que se va acumulando en el pavimento debido al paso repetitivo de los vehículos el cual genera la formación de delgadas depresiones longitudinales a lo largo de la trayectoria de las llantas”.

Pueden generar fallas estructurales o funcionales en el pavimento y ocurre en cualquier capa de la estructura. Sin embargo investigadores como Sousa et al. (1994) y Chen et al. (2003) han demostrado y reportado que la mayor parte del ahuellamiento se genera en la capa asfáltica.

Ensayo de Rueda Carga de Hamburgo (Wheel-Tracking) (AASHTO T-324)

Importancia:

“El método es utilizado para determinar la susceptibilidad a la falla prematura de las mezclas asfálticas en caliente debido a la debilidad de la

estructura de agregado, una rigidez inadecuada del ligante asfáltico o por daño inducido por humedad” (LanammeUCR, 2018).

Procedimiento:

Según Rondón y Reyes (2015) “para este ensayo se requiere de una losa de mezcla asfáltica o un espécimen rectangular es sumergido en agua a 50 °C y la cual es deformada debido al paso repetido de una carga rodante de acero de 703N que simula la forma de una llanta vehicular”. Este ensayo ha sido ampliamente utilizado en Alemania para evaluar la susceptibilidad de mezclas asfálticas a la humedad. El equipo aplica como máximo 2×10^4 ciclos de carga o una deformación de 12.5 cm. Si las muestras son cilíndricas, sus dimensiones son de 15.24 cm y 7.62 cm de diámetro y altura correspondiente. El porcentaje de vacíos que deben presentar las muestras debe estar entre 6 a 8%.

La curva deformación pasada obtenida con la prueba de la rueda cargada de Hamburgo presenta tres puntos: Pendiente de rodera o pendiente de fluencia, punto de inflexión y pendiente de desgranamiento. “La pendiente de rodera se presenta antes de que inicie la pendiente de desgranamiento. En esta zona es donde puede presentarse la deformación por rodera y el flujo plástico de la mezcla. La pendiente de desgranamiento es un indicador del grado de severidad del daño por humedad. El punto de inflexión está relacionado con la resistencia de la mezcla por efecto de humedad” (Torres, et al, 2016).

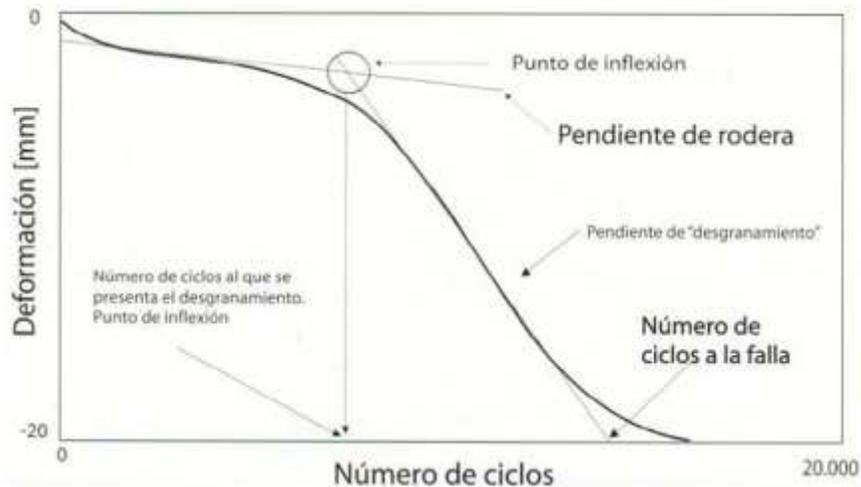


Figura 10: Esquemática deformación-pasadas (ciclos) por susceptibilidad a la humedad

Fuente: Torres, et al, 2016

2.3.8.2. Daño por humedad en mezclas asfálticas:

“El daño por humedad está muy relacionado con el enlace por cohesión, que involucra la fuerza de cohesión del asfalto y con el enlace por adhesión, que más bien tiene que ver con la fuerza de interacción entre el agregado y el asfalto” (Cheng, 2002).

“No obstante, dentro de las metodologías de diseño más utilizadas actualmente, estas propiedades no es algo que se consideren al nivel de detalle que realmente se requiere” (Vidal, 2016).

Ensayo Lottman Modificado (AASHTO T-283)

Importancia:

“El método es utilizado para determinar la susceptibilidad al daño ocasionado por humedad y también la evaluación de la adherencia árido-ligante de las mezclas asfálticas compactadas” (Centro de investigación vial UTN-FRLP, 2015)

Procedimiento:

El método consiste en someter especímenes de compactación con 0.5% de vacíos a dos tipos de condiciones: seco y húmedo, antes de su rotura a tracción indirecta. Estas condiciones pre establecidas sirven como simulación de las

variaciones de condiciones a las que se puede enfrentar el pavimento asfáltico y sobre todo al daño ocurrido por humedad inducida.

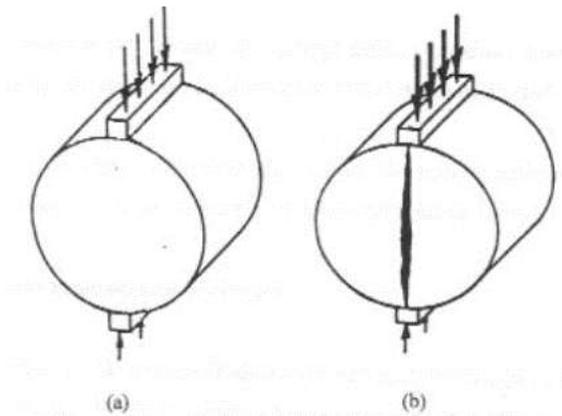


Figura 11: Configuración de la carga (a) y rotura del ensayo de tracción indirecta (b)

Fuente: Padilla, 2004.

2.3.8.3. Módulo Resiliente en mezclas asfálticas

“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).

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

Importancia:

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 mecánico 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).

Procedimiento:

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 determinan 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).

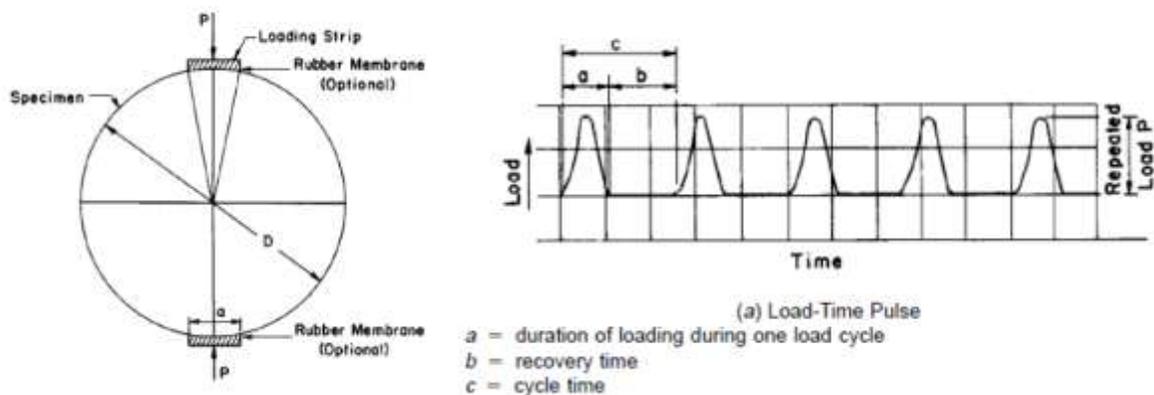


Figura 12: Prueba de módulo resiliente según la norma ASTM D4123-82

Fuente: ASTM D 4123-82, 1995.

2.4. Definición de términos básicos:

Mezcla asfáltica: “También reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos agregados quedan cubiertos por una película continua del ligante” (Kraemer, 2009).

Stone Mastic Asphalt (SMA): Pertenece a la familia de las mezclas asfálticas en caliente o Hot Mix Asphalt (HMA), siendo considerada una mezcla gap-graded (granulometría semi-abierta o discontinua), que es similar a las mezclas densas ya que ambas producen capas impermeabilizantes a la estructura del pavimento, cuando la compactación es la adecuada.

Flujo: “Deformación vertical total del espécimen sometido a la carga máxima, en este punto la carga empieza a decrecer. Este valor nos indica la resistencia que ofrecerá la carpeta asfáltica al deformarse bajo la acción de las cargas de los vehículos” (Sanchez, 2014)

Estabilidad: “Capacidad de resistir desplazamientos y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetidas, un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos (canales), ondulaciones (corrugación) y otras señas que indican cambios en la mezcla” (Sanchez, 2014)

Daño por humedad: “Está relacionado con el enlace por cohesión, que involucra la fuerza de cohesión del asfalto y con el enlace por adhesión, que más bien tiene que ver con la fuerza de interacción entre el agregado y el asfalto” (Cheng, 2002).

Deformación permanente: “Es uno de los principales mecanismos de daño de capas asfálticas en estructuras de pavimento flexible. Este fenómeno puede ser definido como la deformación vertical permanente que se va

acumulando en el pavimento debido al paso repetitivo de los vehículos el cual genera la formación de delgadas depresiones longitudinales a lo largo de la trayectoria de las llantas” (Rondón y Reyes, 2015).

Módulo resiliente: “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).

Susceptibilidad: Está referido a alguna cosa que es posible modificar o influenciar por algo o alguien más (de mayor o menor predisposición).

Celulosa: “Es un producto de origen vegetal y renovable. La principal fuente de celulosa es la madera, aunque también se obtiene de otras especies vegetales (paja, cereales, restos de podas, plantas herbáceas). Se trata de una sustancia con una superficie específica elevadísima y una densidad aparente muy pequeña (entre 30 y 300 gr/l, según su procesamiento)” (ASEFMA, 2013).

Cal hidratada: Es un compuesto químico con que comúnmente se le llama al óxido de calcio. Se obtiene como resultado de la calcinación de la roca caliza. Se da la posibilidad de agregar agua a la cal, obteniendo así un compuesto químico hidratado al cual se le denomina cal apagada, hidróxido de calcio o cal hidratada.

Bagazo de caña de azúcar: “Es un material fibroso, heterogéneo en cuanto a su composición granulométrica y estructural, que presenta relativamente baja densidad y un alto contenido de humedad, en las condiciones en que se obtiene del proceso de molienda de la caña” (Subirós, 2000).

2.5. Fundamentos teóricos que sustenta las hipótesis

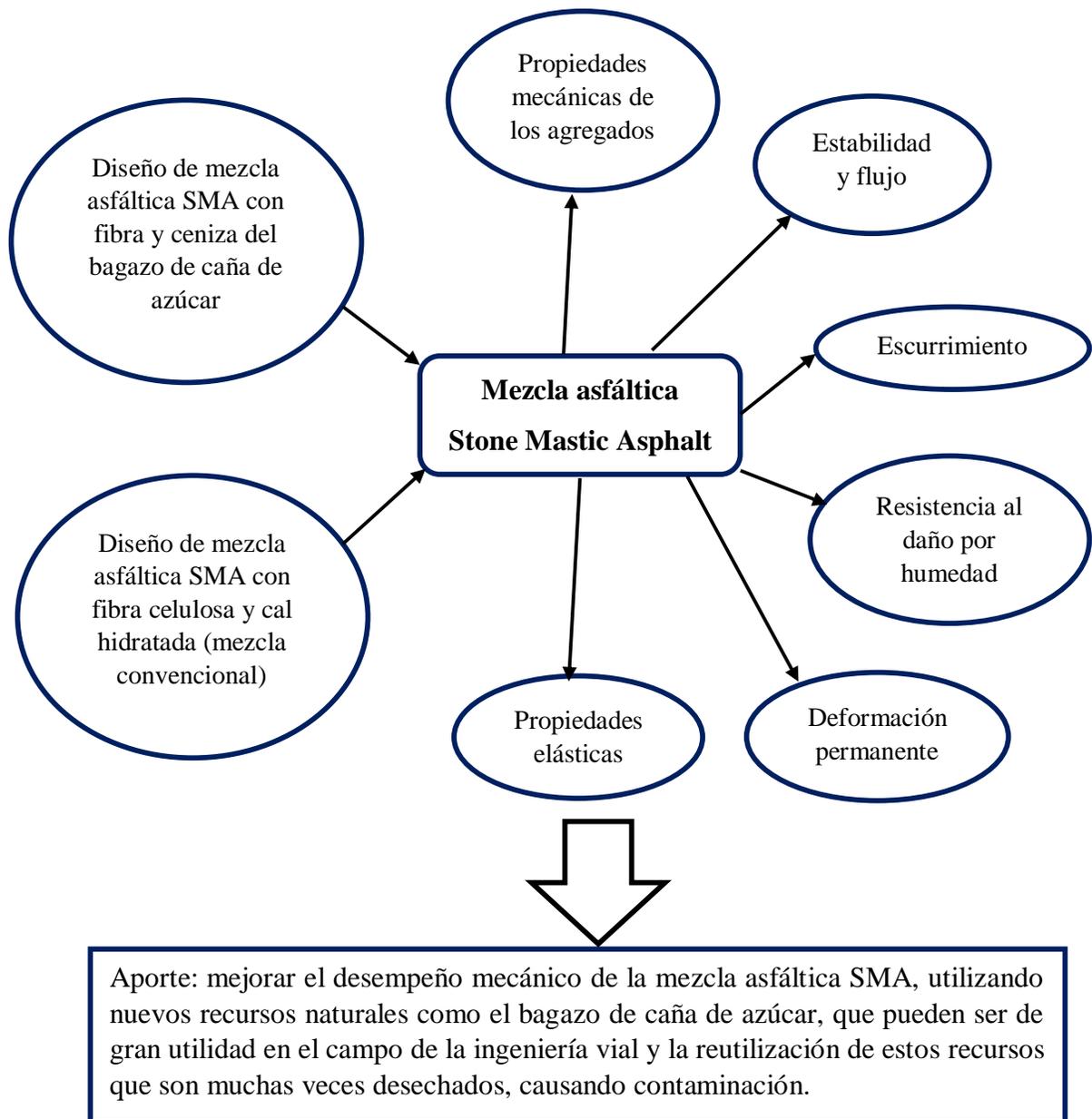


Figura 13: Fundamentos teóricos

Fuente: Elaboración propia.

2.6. Hipótesis.

2.6.1. Hipótesis general:

El diseño de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar, mejora el desempeño mecánico, a través de ensayos de laboratorio.

2.6.2. Hipótesis específicas:

- 1) La reducción del escurrimiento de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar, reduce la susceptibilidad al daño por humedad, a través del ensayo AASHTO T-283.
- 2) La reducción del flujo de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar, disminuye la susceptibilidad a la deformación permanente, a través del ensayo AASHTO T – 324.
- 3) El incremento de la estabilidad de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar, mejora la elasticidad, a través del ensayo AASHTO TP – 31.

2.7. Variables:

Para la investigación se considera como variable: diseño de mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar y su desempeño mecánico.

La variable diseño de mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar, es una variable cuantitativa continua, por su posición es la variable independiente, de escala de razón.

2.7.1. Definición conceptual de la variable

La variable, desempeño mecánico, es una variable cuantitativa continua, por su posición es la variable independiente, de escala de razón.

Variable independiente:

Diseño de mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar: Combinación de asfalto y agregados minerales, estabilizado con la fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar que evita el escurrimiento del ligante asfáltico.

Variable dependiente:

Desempeño mecánico: Capacidad mecánica que ayuda a distribuir el esfuerzo en la estructura del pavimento.

2.7.2. Operacionalización de las variables

Tabla 9:
Operacionalización de variables

Variables	Definición	Dimensiones	Indicadores	Instrumentación	Herramientas
<u>Variable Independiente</u> Mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar	Combinación de asfalto y agregados minerales, estabilizado con la fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar que evita el escurrimiento del ligante asfáltico.	Propiedades mecánicas de los agregados	Abrasión	Especificaciones técnicas de la mezcla asfáltica SMA	AASHTO T 96
			Absorción		AASHTO T 85
			Durabilidad cara fracturadas		AASHTO T 104
			Angularidad		ASTM D 5821
			Partículas chatas y largas		AASHTO D4791
			Limite liquido e índice de plasticidad		AASHTO T89 y T90
		Estabilidad y flujo	Contenido de asfalto	Ensayo Marshall	AASHTO T 245 MTC E 504.
			% de vacíos		
			Agregados (fino y grueso)		
			Fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar		
		Escurrecimiento del asfalto	Ligante asfáltico	Ensayo de escurrimiento del asfalto	AASHTO T 305.
			Fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar temperatura		
<u>Variable dependiente</u> Desempeño mecánico	Capacidad mecánica que ayuda a distribuir el esfuerzo en la estructura del pavimento.	Resistencia al daño por humedad	Ligante asfáltico deformación	Ensayo de tracción indirecta	AASHTO T 283.
		Deformación permanente	Trafico temperatura	Ensayo de rueda de Hamburgo	AASHTO T 324
		Propiedades elásticas	Viscosidad deformación	Ensayo de módulo resiliente	AASHTO TP31

Fuente: Elaboración Propia.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO.

3.1. Tipo, método y diseño de la investigación:

3.1.1. Método de investigación:

El método de la investigación es Deductivo, porque se encuentra bajo el marco de la investigación científica, ya que va generar nuevos conocimientos con un nuevo diseño de mezcla asfáltica SMA teniendo como estabilizante a la fibra y como filler a la ceniza de bagazo de caña de azúcar, para procurar dar soluciones prácticas, por ello la investigación tiene el siguiente procedimiento: revisión de la teoría, planteamiento de la hipótesis, contrastación de la hipótesis, evaluación y conclusión de los resultados.

De acuerdo al enfoque de la investigación, es Cuantitativa, ya que se realizó mediciones objetivas de los indicadores empleando valores numéricos y comparar dos diseños de mezcla asfáltica, el primer será el diseño convencional de mezcla asfáltica con el método S.M.A. y el segundo será el diseño de una mezcla modificada con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar, donde se compara el desempeño mecánico de los dos diseños y poder verificar que el segundo diseño funciona como estabilizante de la mezcla.

De acuerdo a la fuente donde se va recabar los datos es Retrolectiva, ya que existen formatos, fichas y encuestas donde se va a tomar nota de todos los ensayos realizados a los agregados y de las mezclas asfálticas con la tecnología SMA, utilizando formatos de ASTM, MTC, AASHTO y NTP.

3.1.2. Tipo de investigación

El tipo de la investigación es Correlacional, porque se va definir el grado de relación que hay entre las variables de estudio, también la relación que tiene la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza de bagazo de caña de azúcar con la mezcla asfáltica SMA convencional. Explicativo, porque se va comprobar las hipótesis

planteadas y explicar los resultados del desempeño mecánico a través de ensayos dinámicos de la mezcla asfáltica de fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar; También con la mezcla asfáltica SMA convencional.

3.1.3. Nivel de la investigación

La investigación es de nivel Explicativo, porque se va a comparar dos grupos distintos, el primer grupo será el diseño convencional de mezcla asfáltica SMA, el otro será sustituyendo la fibra celulosa y la cal hidratada, por la fibra natural y la ceniza del bagazo de caña de azúcar, donde se comparara el desempeño mecánico de los dos diseños y poder verificar que la fibra y la ceniza del bagazo de caña de azúcar, si funciona como estabilizante y como adherente de la mezcla SMA.

3.1.4. Diseño de la investigación

El diseño de estudio de la investigación es Experimental, porque se va a manipular deliberadamente la variable independiente, va a estar sometido a constante variación y medición por varios ensayos de laboratorios, hasta encontrar la óptima cantidad de fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar para estabilizar la mezcla asfáltica SMA.

Con grupo control post – test

GE : A X O1

GC: A O2

O: Observación o resultado de la variable dependiente

X: Aplicación de la variable independiente

A: Aleatorizado

GE: Grupo experimental

GC: Grupo control

De acuerdo a los números de mediciones es Longitudinal, los ensayos de laboratorio que va a estar sometido los agregados, el asfalto, la fibra y ceniza de

bagazo de caña de azúcar, son alterados en su análisis en diferentes tiempos, ocasiones según su cronología y los datos serán obtenidos en varios tiempos.

3.1.5. Estudio del diseño

El estudio de diseño es de cohortes, porque la investigación analiza un grupo particular que presenta y acondiciona ciertas características y observan los resultados a futuro, es decir procedimos desde las causas hacia los efectos.

3.2. Población y muestra:

La población está conformada por 54 especímenes de mezcla asfáltica SMA (con la fibra celulosa y cal hidratada, con la fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar), lo cual la muestra está distribuida por cada componente con 27 especímenes (ver tabla 10 y 11) y cada ensayos tienen por diseño un porcentaje de fibra, tres porcentaje de filler y cuatro porcentajes de asfalto para lograr el mejor desempeño mecánico de las mezclas.

Tabla 10:

Muestras de ensayos con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar.

Componente	Ensayos	Fibra BCA	Ceniza BCA	Asfalto			
				6%	6.50%	7%	7.50%
Mezcla Asfáltica SMA con fibra y ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar	Parámetros volumétricos	0.30%	6%	3	3	3	3
	Escurrecimiento de ligante asfáltico	0.30%	6%	3	3	3	3
	Resistencia retenida a la tracción	0.30%	6%			1	
	Deformación permanente	0.30%	6%			1	
	Propiedades elásticas	0.30%	6%			1	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11:

Muestras de ensayos con fibra celulosa y cal hidratada

Componente	Ensayos	Fibra Celulosa	Cal hidratada	Asfalto			
				6%	6.50%	7%	7.50%
	Parámetros volumétricos	0.30%	6%	3	3	3	3
	Escurrecimiento de ligante asfáltico	0.30%	6%	3	3	3	3
Mezcla Asfáltica SMA convencional	Resistencia retenida a la tracción	0.30%	6%			1	
	Deformación permanente	0.30%	6%			1	
	Propiedades elásticas	0.30%	6%			1	

Fuente: Elaboración propia

Muestra:

Para la muestra se toma el 100% de la población, por ser datos controlados y tener mejores resultados a la hora de comparar los diseños de mezclas.

3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos:

El método de recolección de datos formatos existentes del AASHTO, MTC, ASTM y NTP que nos facilitara la toma de datos con sus formatos y su metodología implementada de manera internacional y nacional, que son estandarizados.

3.3.1. Instrumento de recolección de datos:

Se considera como instrumento de recolección de datos, los formatos estandarizados de los ensayos de laboratorio según las especificaciones de la normativa internacional y nacional como se puede visualizar en la tabla 12 normativas para la caracterización de agregados, en la tabla 13 ensayo de ligante y en la tabla 14 diseño y ensayos dinámicos.

Tabla 12:

Normativas para la caracterización de agregados.

Ensayo	Norma	Tipo de agregado
Determinación del límite plástico e índice de plasticidad	ASTM D 4318	Agregado fino
Angularidad del agregado fino	ASTM C 1252	Agregado fino
Valor se azul de metileno	AASHTO T330	Agregado fino
Equivalente de arena en suelo y agregado fino	ASTM D 2419	Agregado fino
Gravedad específica del agregado fino	ASTM C 128	Agregado fino
Gravedad específica del agregado grueso	ASTM C127	Agregado grueso
Efecto del agua sobre agregados con recubrimientos bituminosos usando agua	MTC 517 MTC 521	Agregado grueso
Porcentaje de caras fracturadas en los agregados	ASTM D 5821	Agregado grueso
Porcentaje de partículas chatas y alargadas	ASTM D 4791	Agregado grueso
Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1½") por medio de la máquina de los ángeles	ASTM C 131	Agregado grueso
Índice de durabilidad del agregado fino y grueso	ASTM C 3744	Agregado fino y grueso
Inalterabilidad de los agregados por medio del sulfato de sodio o magnesio	ASTM C 88	Agregado fino y grueso
Sales solubles totales en agregados	MTC E 219	Agregado fino y grueso
Análisis granulométrico de los agregados	ASTM C 136	Agregado fino y grueso

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13:

Ensayo de ligante.

Ensayo	Norma
Punto de ablandamiento	ASTMD36
Penetración	ASTM D5
Punto de Inflamación	ASTM D92
Recuperación elástica torsional	NTL 329
Recuperación elástica lineal	ASTM D6084
Viscosidad rotacional Brookfield	ASTM D4402
Variación de masa	ASTM D2872
Ductilidad	ASTM D113

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14:

Diseño y ensayos dinámicos.

Ensayo	Norma
Especificación de diseño SMA	
- Diseño Marshall (MS-22, Asphalt institute)	
- Rice (MTC 508)(d2041)	
- resistencia de mezclas bituminosas empleando el aparato marshall (mtc 504)(D6926)	AASHTO M325
- % de vacíos (mtc 505)(D3203)	
- % absorbido de asfalto (mtc 511)	
- Gravedad específica bulk (ASTM D 2726)	
- Estabilidad y flujo marshall (D6927)	
Rueda de hamburgo	AASHTO T324
Resistencia retenida a la tensión diametral (Lottman)	AASHTO T 283
Módulo resiliente a la tensión diametral	AASHTO TP31

Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Validez del instrumento

Los instrumentos referenciados en las tablas 12, 13 y 14 están validados a nivel internacional y nacional como las normativas ASTM, AASHTO, MTC y NTP que son utilizadas para el diseño de mezcla asfáltica SMA, también para la caracterización de los agregados, ligante y ensayos dinámicos.

3.3.3. Confiabilidad del instrumento

La confiabilidad de los instrumentos se da con la aprobación de los manuales utilizados internacional y nacional, a ello se suma los datos fiables de los ensayos practicados con los certificados de calibración de los equipos utilizados.

3.4. Descripción de procedimientos de análisis:

Tabla 15:

Matriz de análisis de datos

Variable	Indicador	Escala de medición	Estadísticos Descriptivos	Análisis Inferencial
Resistencia al daño por humedad	Ligante asfáltico Deformación		De tendencia central: Media, mediana, moda De dispersión:	
Deformación permanente	Trafico Temperatura	De proporción o razón	desviación estándar y coeficiente de variación	t de Student
Propiedades elásticas	Viscosidad Deformación		De forma: asimetría y curtosis De posición: cuartiles	

Fuente: Elaboración propia

3.4.1. Caracterización de los agregados

3.4.1.1 Agregado grueso

De acuerdo a la EG-2013, Los agregados pétreos no serán susceptibles de ningún tipo de meteorización o alteración fisicoquímica, apreciable bajo las condiciones más desfavorables que se puedan dar en la zona de empleo. Tampoco podrán dar origen, con el agua, a disoluciones que puedan causar daños a estructuras o a otras capas del pavimento, o contaminar corrientes de agua.

Por eso en la tabla 16, nos recomienda cumplir con los requisitos mínimos del agregado grueso, para que pueda ser utilizado en la mezcla asfáltica SMA.

Tabla 16:
Requerimientos para los agregados gruesos

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		Altitud (m.s.n.m)	
		≤ 3000	> 3000
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	MTC E 209	15% máx.	15% máx.
Abrasión (Los Ángeles)	MTC E 207	25% máx.	20% máx.
Adherencia	MTC E 517	+95	
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35% mín.	35% mín.
Partículas chatas y alargadas	MTC E 221	25% máx.	25% máx.
Caras fracturadas	MTC E 210	100/90	100/90
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0,5% máx.	0,5% máx.
Absorción	MTC E 206	2,0% máx.	1,0% máx.

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

Los agregados fueron extraído de la cantera Crushing, ubicada en el distrito de Lurín, lo cual las propiedades mecánicas del agregado grueso, cumple con todos los requisitos mínimos recomendados en la tabla 17, siendo un agregado óptimo para la investigación (ver anexo 3).

Tabla 17:
Propiedades mecánicas del agregado grueso

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		Altitud (m.s.n.m)	
		≤ 3000	> 3000
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	MTC E 209	6.7%	
Abrasión (Los Ángeles)	MTC E 207	9.2%	

Adherencia	MTC E 517	+95
Índice de Durabilidad	MTC E 214	84.7%
Partículas chatas y alargadas	MTC E 221	5.4%
Caras fracturadas	MTC E 210	100%
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0.05%
Absorción	MTC E 206	1%

Fuente: Elaboración propia

a. Análisis granulométrico del agregado grueso

Para el análisis granulométrico se cumple la norma ASTM C – 136, donde nos muestra los requisitos mínimos, para que el agregado grueso sea útil en la mezcla asfáltica SMA.

Tabla 18:

Análisis granulométrico del agregado grueso

Mallas					
Serie	Abertura	Peso ret.	Ret. Par.	Ret. Ac.	Pasa
Americana	(mm)	(gr)	%	%	%
2"	50.800		0.0	0.0	
1 1/2"	38.100		0.0	0.0	
1"	25.400				
3/4"	19.050		0.0	0.0	100.0
1/2"	12.700	700.3	8.6	8.6	91.4
3/8"	9.525	3024.0	37.1	45.7	54.4
1/4"	6.350				
# 4	4.760	4433.7	54.4	100.0	0.0
# 6	3.360				
# 8	2.380				
# 10	2.000				
# 16	1.190				
# 20	0.840				

# 30	0.590
# 40	0.426
# 50	0.297
# 80	0.177
# 100	0.149
# 200	0.074
< # 200	(ASTM C-117)

Fuente: Elaboración propia

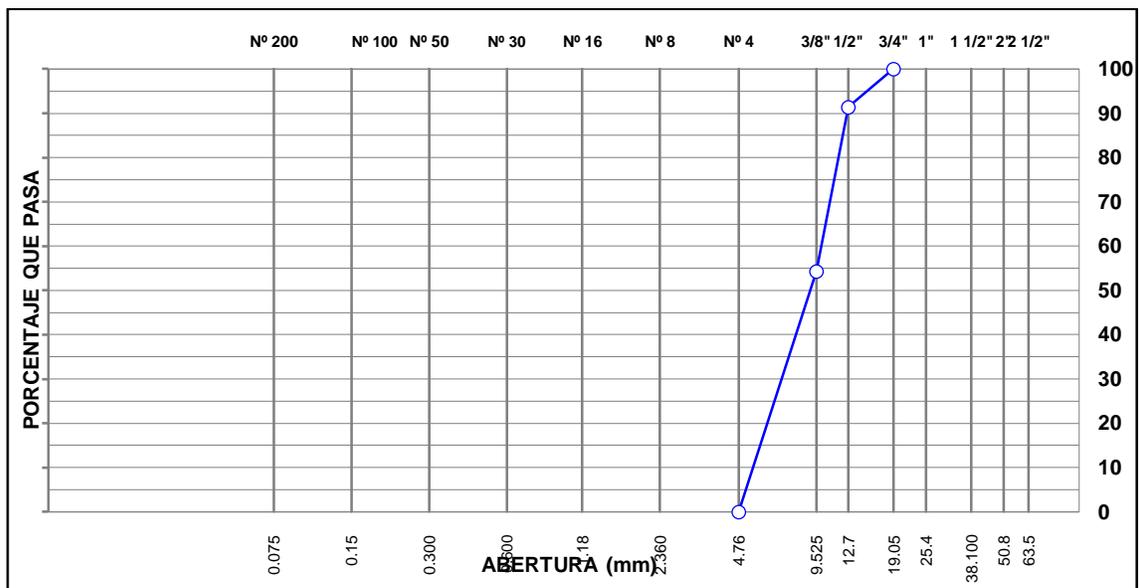


Figura 14: Curva granulométrica del agregado grueso

Fuente: Elaboración propia

3.4.1.2 Agregado fino

De acuerdo a la EG-203, El agregado fino deberá proceder en su totalidad de la trituración de piedra de cantera o de grava natural, o parcialmente de fuentes naturales de arena. En la tabla 19, se muestra los requisitos mínimos que tiene que cumplir el agregado fino, para ser utilizado en una mezcla SMA.

Tabla 19:
Requerimientos para los agregados finos.

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		Altitud (m.s.n.m)	
		≤ 3000	> 3000
Equivalente de Arena	MTC E 114	60	70
Angularidad del agregado fino	MTC E 222	30	40
Azul de metileno	AASTHO TP 57	8 máx.	8 máx.
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	MTC E 209	15% máx.	15% máx.
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35 mín.	35 mín.
Índice de Plasticidad (malla N° 200)	MTC E 111	4 máx.	NP
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0,5% máx	0,5% máx.
Absorción	MTC E 205	0,5% máx.	0,5% máx.

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

El agregado fino de la cantera Crushing, las propiedades mecánicas del agregado, cumple con todos los requisitos mínimos recomendados en la tabla 20, siendo un agregado óptimo para la investigación (ver anexo 3).

Tabla 20:
Propiedades mecánicas del agregado fino

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		Altitud (m.s.n.m)	
		≤ 3000	> 3000
Equivalente de Arena	MTC E 114	64	-
Angularidad del agregado fino	MTC E 222	38.9	-
Azul de metileno	AASTHO TP 57	5	-
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	MTC E 209	5.2%	-
Índice de Durabilidad	MTC E 214	54	-

Índice de Plasticidad (malla N° 200)	MTC E 111	4	-
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0.05%	-
Absorción	MTC E 205	0.8	-

Fuente: Elaboración propia

a. Análisis granulométrico del agregado fino

Para el análisis granulométrico se cumple la norma ASTM C – 136, donde nos muestra los requisitos mínimos, para que el agregado fino sea útil en la mezcla asfáltica SMA.

Tabla 21:

Análisis granulométrico del agregado fino

Mallas					
Serie	Abertura	Peso ret.	Ret. Par.	Ret. Ac.	Pasa
Americana	(mm)	G	%	%	%
2"	50.800				
1 1/2"	38.100				
1"	25.400				100.0
3/4"	19.050				100.0
1/2"	12.700				100.0
3/8"	9.525				
1/4"	6.350				100.0
# 4	4.760	47.8	2.8	2.8	97.2
# 6	3.360		0.0	2.8	97.2
# 8	2.380	421.4	24.6	27.3	72.7
# 10	2.000		0.0	27.3	72.7
# 16	1.190	319.6	18.6	46.0	54.0
# 20	0.840		0.0	46.0	54.0
# 30	0.590	212.1	12.4	58.3	41.7
# 40	0.426		0.0	58.3	41.7

# 50	0.297	187.3	10.9	69.2	30.8
# 80	0.177		0.0	69.2	30.8
# 100	0.149	143.7	8.4	77.6	22.4
# 200	0.074	97.0	5.7	83.3	16.8
< # 200 (ASTM C-117)		287.3	16.7	100.0	0.0

Fuente: Elaboración propia

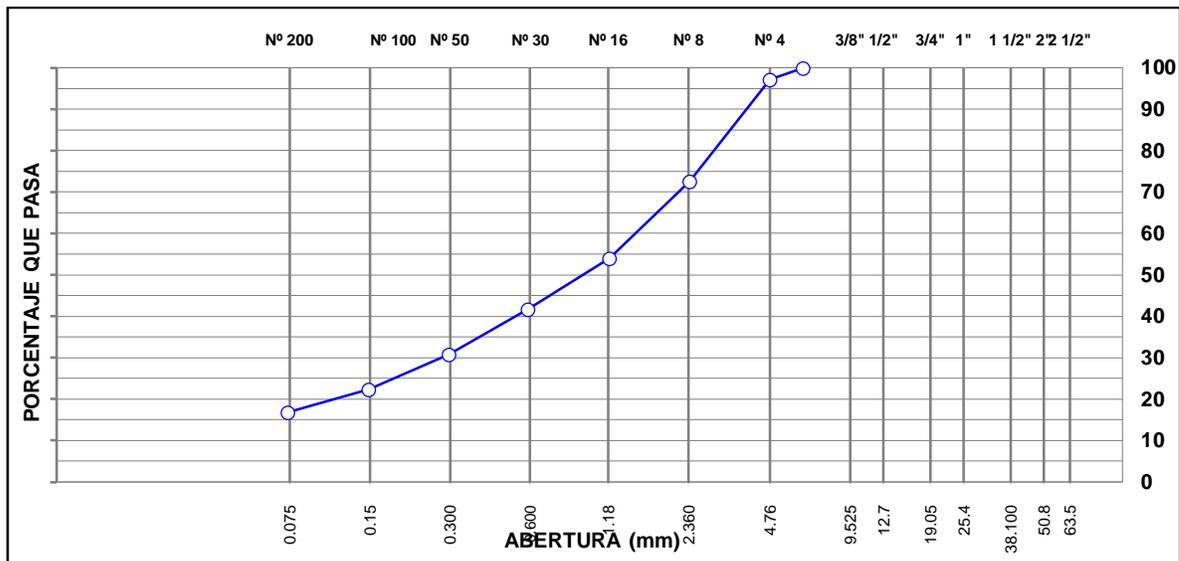


Figura 15: curva granulométrica del agregado fino.

Fuente: Elaboración propia

3.4.2. Diseño de mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza de bagazo de caña de azúcar

3.4.2.1 Combinación de agregados grueso y fino

Las distintas fracciones de agregados, incluyendo el relleno mineral (filler), deberán combinarse en proporciones tales que la mezcla resultante cumpla con alguna de las bandas granulométricas especificadas en la tabla 22.

En la tabla 22, se observa los contenidos mínimos granulométricos de la combinación de agregados, referente al tamaño máximo y a los tamices utilizados para una mezcla asfáltica SMA.

Tabla 22:

Granulometría para mezcla Stone Mastic Asphalt.

Tamiz		Porcentaje que pasa			
		Tamaño máximo 20mm	Tamaño máximo 12.5 mm	Tamaño máximo 10 mm	Tamaño máximo 5 mm
25.0 mm	1"	100	-	-	-
19.0 mm	3/4"	90 – 100	100	-	-
12.5 mm	1/2"	45 – 60	90 – 100	100	-
9.5 mm	3/8"	30 – 45	60 max.	90 – 100	-
6.3 mm	1/4"	-	-	-	100
4.75 mm	N°4	20 – 25	30 – 40	26 – 60	90 – 100
2.5 mm	N°8	16 – 23	20 – 27	20 – 28	30 – 40
7.5 µm	N°200	9 - 13	9 - 13	9 - 13	9 - 13

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

La combinación de agregados de la cantera Crushing, cumple con la gradación de tamaño máximo 12.5 mm, que viene desde el tamiz 19mm al N° 200, lo cual se muestra en la figura 16.

Tabla 23:

Combinación de agregado grueso y fino

Mallas						
Serie	Abertura	Ret. Par.	Ret. Ac.	Pasa	Gradación SMA -	
Americana	(mm)	%	%	%	AASHTO M325-08	
2"	50.800	0.0	0.0	100.0		
1 1/2"	38.100	0.0	0.0	100.0		
1"	25.400	0.0	0.0	100.0		
3/4"	19.050	0.0	0.0	100.0	100	100
1/2"	12.700	6.3	6.3	93.7	90	100
3/8"	9.525	27.1	33.3	66.7	50	80
1/4"	6.350	0.0	33.3	66.7		
# 4	4.760	40.3	73.6	26.4	20	35
# 6	3.360	0.0	73.6	26.4		
# 8	2.380	5.2	78.7	21.3	16	24
# 10	2.000	0.0	78.7	21.3		
# 16	1.190	3.9	82.7	17.3		
# 20	0.840	0.0	82.7	17.3		
# 30	0.590	2.6	85.2	14.8		
# 40	0.426	0.0	85.2	14.8		
# 50	0.297	2.3	87.5	12.5		
# 80	0.177	0.0	87.5	12.5		
# 100	0.149	1.8	89.3	10.7		
# 200	0.074	1.2	90.5	9.5	8	11
< # 200	---	9.5	100.0	0.0		

Fuente: Elaboración propia

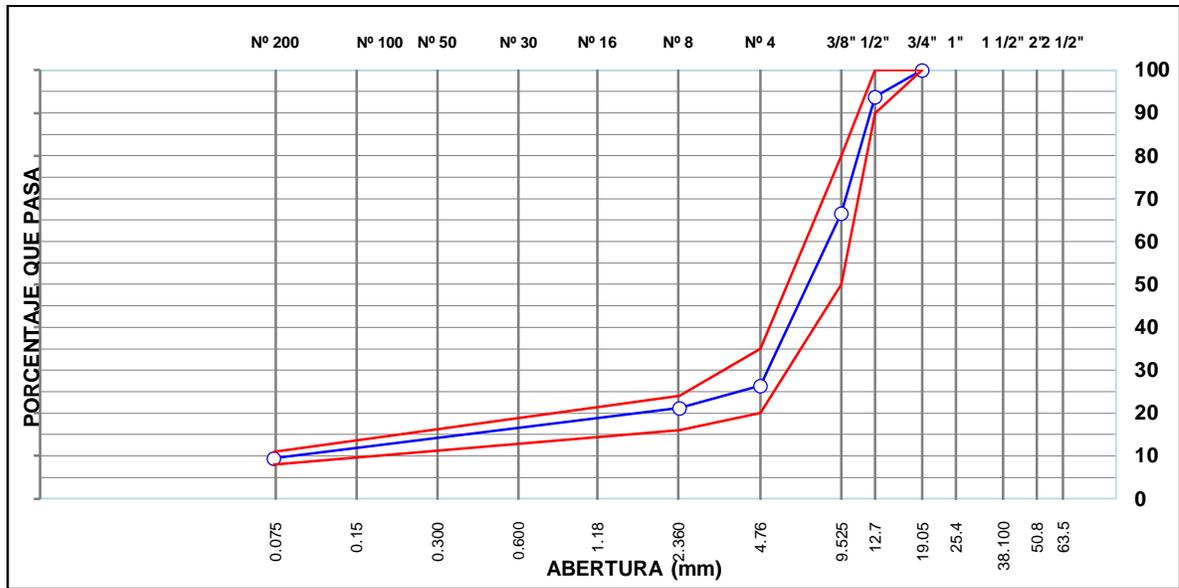


Figura 16: Curva granulométrica de la combinación de agregados

Fuente: Elaboración propia

3.4.2.2 Cálculo del diseño de mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar.

Tabla 24:

Cálculo del diseño de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza de bagazo de caña de azúcar

N° Briquetas	1	1-A	1-B*	2	2-A	2-B*	3	3-A	3-B*	4	4-A	4-B*
1 % C.a. en peso de la mezcla	6.0	6.0	6.0	6.5	6.5	6.5	7.0	7.0	7.0	7.5	7.5	7.5
% A. Grueso (tmm 1/2) en												
2 Peso de la mezcla	68.62	68.62	68.62	68.26	68.26	68.26	67.89	67.89	67.89	67.53	67.53	67.53
% A. Fino chancado en peso												
3 de la mezcla	19.74	19.74	19.74	19.64	19.64	19.64	19.53	19.53	19.53	19.43	19.43	19.43
% Filler ceniza de bagazo en												
4 peso de la mezcla	5.64	5.64	5.64	5.61	5.61	5.61	5.58	5.58	5.58	5.55	5.55	5.55
Peso específico del c.a.												
5 aparente	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017
Peso específico bulk del												
6 agregado grueso	2.703	2.703	2.703	2.703	2.703	2.703	2.703	2.703	2.703	2.703	2.703	2.703
Peso específico bulk del												
7 agregado fino chancado	2.686	2.686	2.686	2.686	2.686	2.686	2.686	2.686	2.686	2.686	2.686	2.686
Peso específico del filler												
8 ceniza del bagazo de caña	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50

	Peso de la briqueta en el aire												
9	(g)	1143.1	1142.6	1145.6	1152.5	1152.4	1150.2	1165.8	1164.9	1163.2	1173.7	1172.5	1171.2
	Peso de la briqueta en el aire												
10	ss (g)	1150.5	1150.2	1155.1	1155.8	1155.9	1153.2	1167.1	1166.2	1164.8	1175.0	1174.2	1173.1
	Peso de la briqueta en el												
11	agua (g)	644.4	647.2	651.3	651.5	651.0	648.4	657.2	657.6	658.2	665.1	665.0	664.7
12	Vlumen de la briqueta (cm ³)	506.1	503.0	503.8	504.3	504.9	504.8	509.9	508.6	506.6	509.9	509.2	508.4
	Peso específico bulk de la												
13	briqueta	2.259	2.272	2.274	2.285	2.282	2.279	2.286	2.290	2.296	2.302	2.303	2.304
	Peso unitario de la briqueta												
	a 25°C (g/cm ³)- ASTM D												
14	2726	2.252	2.265	2.267	2.278	2.275	2.272	2.279	2.283	2.289	2.295	2.296	2.297
	Peso específico máximo -												
15	astm d 2041	2.413	2.413	2.413	2.392	2.392	2.392	2.376	2.376	2.376	2.361	2.361	2.361
16	% Vacios - astm d 3203	6.4	5.8	5.8	4.5	4.6	4.7	3.8	3.6	3.4	2.5	2.5	2.4
	Peso específico bulk del												
17	agregado total	2.576	2.576	2.576	2.576	2.576	2.576	2.576	2.576	2.576	2.576	2.576	2.576
18	V.m.a. (%)	17.6	17.1	17.0	17.1	17.2	17.3	17.5	17.3	17.1	17.3	17.3	17.3
19	% Vacíos llenados con c.a.	63.6	66.1	65.9	73.7	73.3	72.8	78.3	79.2	80.1	85.5	85.5	86.1
	Peso específico efectivo del												
20	agregado total	2.645	2.645	2.645	2.640	2.640	2.640	2.642	2.642	2.642	2.644	2.644	2.644

Asfalto absorbido por el												
21	agregado total	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
22	% Asfalto efectivo	5.03	5.03	5.03	5.60	5.60	5.60	6.07	6.07	6.07	6.56	6.56
23	FLUJO (0,01pulgada)	10.0	11.0	11.0	12.0	12.0	13.0	14.0	13.0	13.0	15.0	15.0
24	Estabilidad sin corregir	1009	1035	1052	1263	1306	1263	1204	1136	1179	929	925
25	Factor de estabilidad (tabla)	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.00	1.00	1.04	1.00	1.00
26	Estabilidad corregida (kg)	1050	1076	1094	1314	1358	1314	1204	1136	1226	929	925

Fuente: Elaboración propia

Diseño de mezcla optima de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del
bagazo de caña de azúcar

Mezcla de agregados (porcentajes en peso)

Piedra chancada	: 73%
Arena chancada	: 21%
Ceniza del bagazo de caña de azúcar	: 6%
Optima	: especificación AASHTO : M 325-08

Ligante bituminoso

Tipo de asfalto	: asfalto modificado tipo IC
% óptimo de C.A.	: 7.0

Fibra del bagazo de caña de azúcar

Tipo de fibra	: fibra de bagazo de caña
% de fibra	: 0.3%

Aditivo

Tipo de aditivo	: Quimibond Advance
% de aditivo en peso del C.A.	: 0.5%

Resultados del ensayo Marshall del diseño de mezcla asfáltica SMA con
fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar, para determinar el escurrimiento, la
estabilidad y flujo de la mezcla.

Tabla 25:

Características Marshall modificado con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar

Características de la mezcla	Resultados			Especificación
				AASHTO M 325-08
N° de golpes	50			50 golpes por cara
Cemento asfáltico (% en peso de la mezcla total)	6.80	7.00	7.20	6.0 % mínimo
Densidad seca bulk (g/cm ³)	2.288	2.292	2.296	-
Vacíos (%)	4.0	3.5	3.1	3 % - 4%
V.m.a. (%)	17.2	17.3	17.3	17.0 % mínimo
R.b.v. (%)	76.5	79.2	81.9	-
Flujo (0,25 mm)	13.0	13.6	14.2	-
Estabilidad (kg)	1275.0	1189.0	1082.0	-
Vca drc (%)	---	35.6	---	
Vca mix (%)	---	35.2	---	Menor que VCA drc
Escurrecimiento de ligante a la temperatura de mezclado (%)	---	0.22	---	0.3% máximo

Fuente: Elaboración propia

Temperatura de aplicación (°c)

Según carta de viscosidad

Temperatura Mezcla: 165°C - 175 °C

Temperatura de Compactación: 155 °C - 165 °C

3.4.2.3 Cálculo del diseño de mezcla asfáltica SMA con celulosa y cal hidratada.

Tabla 26:

Cálculo del diseño de mezcla asfáltica SMA con celulosa y cal hidratada.

N° Briquetas	1	1-A	1-B*	2	2-A	2-B*	3	3-A	3-B*	4	4-A	4-B*
% C.a. en peso de la												
1 mezcla	6.0	6.0	6.0	6.5	6.5	6.5	7.0	7.0	7.0	7.5	7.5	7.5
% A. Grueso (t _{mn} 1/2) en												
2 peso de la mezcla	68.62	68.62	68.62	68.26	68.26	68.26	67.89	67.89	67.89	67.53	67.53	67.53
% A. Fino chancado en												
3 peso de la mezcla	19.74	19.74	19.74	19.64	19.64	19.64	19.53	19.53	19.53	19.43	19.43	19.43
% Filler cal hidratada en												
4 peso de la mezcla	5.64	5.64	5.64	5.61	5.61	5.61	5.58	5.58	5.58	5.55	5.55	5.55
Peso específico del c.a.												
5 aparente	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017
Peso específico bulk del												
6 agregado grueso	2.703	2.703	2.703	2.703	2.703	2.703	2.703	2.703	2.703	2.703	2.703	2.703
Peso específico bulk del												
7 agregado fino chancado	2.686	2.686	2.686	2.686	2.686	2.686	2.686	2.686	2.686	2.686	2.686	2.686
Peso específico del filler cal												
8 hidratada	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50

	Peso de la briqueta en el												
9	aire (g)	1150.3	1153.1	1152.6	1156.8	1159.3	1156.9	1157.1	1165.8	1164.6	1164.8	1163.2	1163.3
	Peso de la briqueta en el												
10	aire ss (g)	1155.1	1158.6	1157.7	1159.5	1162.5	1159.2	1159.9	1167.1	1166.9	1165.5	1164.2	1164.9
	Peso de la briqueta en el												
11	Agua (g)	661.6	661.6	661.2	665.6	666.5	663.2	667.7	670.6	671.6	671.7	671.2	671.7
	Volumen de la briqueta												
12	(cm ³)	493.5	497.0	496.5	493.9	496.0	496.0	492.2	496.5	495.3	493.8	493.0	493.2
	Peso específico bulk de la												
13	briqueta	2.331	2.320	2.321	2.342	2.337	2.332	2.351	2.348	2.351	2.359	2.359	2.359
	Peso unitario de la briqueta												
	a 25°C (g/cm ³)- ASTM D												
14	2726	2.324	2.313	2.314	2.335	2.330	2.325	2.344	2.341	2.344	2.352	2.352	2.352
	Peso específico máximo -												
15	ASTM d 2041	2.472	2.472	2.472	2.456	2.456	2.456	2.434	2.434	2.434	2.415	2.415	2.415
16	% Vacíos - astm d 3203	5.7	6.1	6.1	4.6	4.8	5.0	3.4	3.6	3.4	2.3	2.3	2.3
	Peso específico bulk del												
17	agregado total	2.686	2.686	2.686	2.686	2.686	2.686	2.686	2.686	2.686	2.686	2.686	2.686
18	V.m.a. (%)	18.4	18.8	18.8	18.5	18.7	18.8	18.6	18.7	18.6	18.8	18.8	18.8
	% Vacíos llenados con												
19	c.a.	69.0	67.6	67.6	75.1	74.3	73.4	81.7	80.7	81.7	87.8	87.8	87.8

Peso específico efectivo													
20	del agregado total	2.720	2.720	2.720	2.724	2.724	2.724	2.720	2.720	2.720	2.718	2.718	2.718
Asfalto absorbido por el													
21	agregado total	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
22	% Asfalto efectivo	5.56	5.56	5.56	6.01	6.01	6.01	6.56	6.56	6.56	7.08	7.08	7.08
23	Flujo (0,01pulgada)	9.0	9.0	10.0	10.0	10.0	11.0	12.0	13.0	12.0	13.0	14.0	14.0
24	Estabilidad sin corregir	1221	1242	1200	1411	1496	1369	1369	1369	1284	1200	1157	1157
Factor de estabilidad													
25	(tabla)	1.09	1.04	1.04	1.09	1.04	1.04	1.09	1.04	1.09	1.09	1.09	1.09
26	Estabilidad corregida (kg)	1331	1292	1248	1538	1556	1424	1492	1424	1400	1308	1262	1262

Fuente: Elaboración propia

Diseño de mezcla optima de la mezcla asfáltica SMA con fibra celulosa y cal hidratada (mezcla convencional).

Mezcla de agregados (porcentajes en peso)

Piedra chancada	: 73%
Arena chancada	: 21%
Cal hidratada	: 6%
Optimo	: Especificación AASHTO
	: M 325-08

Ligante bituminoso

Tipo de asfalto	: Asfalto modificado tipo IC
% óptimo de C.A.	: 7.0

Fibra celulosa

Tipo de fibra	: Viatop
% de fibra	: 0.3%

Aditivo

Tipo de aditivo	: Quimibond Advance
% de aditivo en peso del C.A.	: 0.5%

Resultados del ensayo Marshall del diseño de mezcla asfáltica SMA con fibra celulosa y cal hidratada (mezcla convencional), para determinar el escurrimiento, la estabilidad y flujo de la mezcla.

Tabla 27:

Características Marshall modificado con celulosa y cal hidratada

Características de la mezcla	Resultados			Especificación
				AASHTO M 325-08
Nº de golpes	50			50 golpes por cara
Cemento asfáltico (% en peso de la mezcla total)	6.80	7.00	7.20	6.0 % mínimo
Densidad seca bulk (g/cm ³)	2.344	2.349	2.353	-
Vacios (%)	4.0	3.5	3.0	3 % - 4%
V.m.a. (%)	18.6	18.7	18.7	17.0 % mínimo
R.b.v. (%)	78.5	81.1	83.8	-
Flujo (0,25 mm)	11.5	12.1	12.7	-
Estabilidad (kg)	1486.0	1437.0	1373.0	-
Vca drc (%)	---	35.6	---	
Vca mix (%)	---	33.5	---	Menor que VCA drc
Escurrecimiento de ligante a la temperatura de mezclado (%)	---	0.25	---	0.3% máximo

Fuente: Elaboración propia

Temperatura de aplicación (°C)

Según carta de viscosidad

Temperatura Mezcla: 165 °C - 175°C

Temperatura de Compactación: 155 °C - 165 °C

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Resultados con respecto a la reducción del escurrimiento de la mezcla SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar:

4.1.1. Resultado de la resistencia de la mezcla asfáltica SMA compactadas al daño inducido por la humedad

4.1.1.1 Escurrimiento de la fibra de bagazo de caña de azúcar.

0.40% de fibra	0.30% de fibra	0.20% de fibra
		
Resultado 0.2%	Resultado 0.3%	Resultado 0.5%

Figura 17: escurrimiento de mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar.

Fuente: Elaboración propia

Para los valores de drenaje calculados son válidas las siguientes reglas:

$X < 0.2$: muy buen efecto estabilizador.

$0.2 < X < 0.3$: aceptable efecto estabilizador

$X > 0.3$: insuficiente efecto estabilizador

Tabla 28:
Requerimiento para el diseño de la mezcla SMA

Ensayos	Requerimiento
Compactación Marshall	50 golpes por cara
Compactación Superpave	75 a 100 giros, dependiendo del Proyecto
Vacíos de aire totales	2% (climas fríos) 4% (climas templados y cálidos)
Vacíos agregado mineral (VAM)	$\geq 17 \%$
VCA mezcla, % (1)	< que VCA varillado
Contenido de ligante en peso total de la mezcla	$\geq 6,5 \%$
Contenido de fibras celulósicas en peso total de la mezcla	$\geq 0,3 \%$
Escurrimiento de ligante a la temperatura de mezclado	$\leq 0,3 \%$

(1) VCA: Porcentaje de vacíos de la fracción gruesa

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

De acuerdo a la tabla 25 y figura 17, el escurrimiento de la fibra de bagazo de caña de azúcar con el asfalto cumple con los parámetros de la tabla 28, obteniendo un valor de 0.22 a una temperatura de mezcla de 175 a 165°C, entonces la fibra de bagazo de caña de azúcar es útil como un estabilizante de la mezcla asfáltica SMA.

4.1.1.2 Daño por humedad de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar

Tabla 29:

Daño por humedad de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar

	Seco			Húmedo		
Muestra	1	2	3	4	5	6
Diametro (pulg)	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
Altura (pulg)	2.44	2.48	2.44	2.47	2.48	2.44
W.Aire (g)	1160.8	1160.0	1160.7	1157.2	1154.6	1162.4
W.SSS (g)	1162.6	1161.0	1161.9	1159.0	1156.2	1164.3
W.Agua (g)	640.1	639.8	639.8	638.4	638.1	641.1
Volumen (cm3)	522.5	521.2	522.1	520.6	518.1	523.2
Densidad (g/cm3)	2.222	2.226	2.223	2.223	2.229	2.222
% Vacios	6.3	6.1	6.2	6.3	6.0	6.3
Someter a Condición Saturada						
55% Sat.				1175.1	1171.7	1180.5
80% Sat.				1183.2	1179.5	1188.8
Promedio				1179.2	1175.6	1184.6
Peso Sat.				1179.4	1174.8	1184.1
% Satur.				68.2	64.9	65.8
Condición temperatura ambiente				24 horas en agua a 60°C + 1hora a 25°C		
W.Aire (g)				1183.3	1179.1	1190.1
W.SSS (g)				1183.3	1179.1	1190.1
W.Agua (g)				661.4	657.4	664.5
Volumen (cm3)				521.9	521.7	525.6
Densidad (g/cm3)				2.267	2.260	2.264
% Vacios				4.4	4.7	4.5
Altura (pulg)	2.44	2.48	2.44	2.48	2.52	2.48
Seco (STD)	296.6	284.7	294.7			
Humedo (STM)				182.9	184.1	185.3

	No Condicionada (N)	Condicionada (N)
	292.0	184.1
TSR	63.0 %	

Fuente: Elaboración propia



Figura 18: Ensayo de Lottman modificado en condición seca.

Fuente: Elaboración propia



Figura 19: Ensayo de Lottman modificado en condición húmeda.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 30:

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 29, nos muestra los resultados del ensayo de Lottman modificado a la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza de bagazo de caña de azúcar, en condición seca y húmeda, teniendo una resistencia a 292 N en condición seca y de 184.1 N en condición húmeda, obteniendo una resistencia a la tracción indirecta (TSR) de 63% y comparando con los requisitos de adherencia de la tabla 30, no cumple con los requisitos mínimos de la norma, para una mezcla asfáltica SMA.

4.1.1.3 Daño por humedad de la mezcla asfáltica SMA con celulosa y cal hidratada (convencional)

Tabla 31:

Daño por humedad de la mezcla asfáltica SMA con celulosa y cal hidratada

	Seco				Húmedo	
Muestra	1	2	3	4	5	6
Diametro (pulg)	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
Altura (pulg)	2.40	2.44	2.44	2.44	2.48	2.48
W.Aire (g)	1160.5	1150.7	1159.5	1162.2	1162.3	1157.1
W.SSS (g)	1162.2	1152.3	1161.7	1163.7	1164.8	1159.5
W.Agua (g)	655.3	648.4	652.4	655.6	657.5	653.5
Volumen (cm ³)	506.9	503.9	509.3	508.1	507.3	506.0
Densidad (g/cm ³)	2.289	2.284	2.277	2.287	2.291	2.287
% Vacios	6.1	6.3	6.6	6.2	6.0	6.2
Someter a Condición Saturada						
55% Sat.				1179.4	1179.0	1174.3
80% Sat.				1187.2	1186.6	1182.1
Promedio				1183.3	1182.8	1178.2
Peso Sat.				1184.4	1182.1	1177.9
% Satur.				71.0	65.1	66.6

	Condición temperatura ambiente			24 horas en agua a 60°C + 1 hora a 25°C		
	W.Aire (g)				1184.6	1189.9
W.SSS (g)				1184.6	1189.9	1182.7
W.Agua (g)				680.2	677.7	674.5
Volumen (cm ³)				504.4	512.2	508.2
Densidad (g/cm ³)				2.349	2.323	2.327
% Vacios				3.6	4.7	4.5
Altura (pulg)	2.40	2.44	2.44	2.40	2.40	2.40
Seco (STD)	342.2	332.4	333.7			
Humedo (STM)				306.3	302.0	304.5
	No Condicionada (N)			Condicionada (N)		
	336.1			304.3		
	TSR 90.5 %					

Fuente: Elaboración propia

Los resultados del ensayo de Lottman modificado a la mezcla asfáltica SMA con celulosa y cal hidratada (mezcla convencional), de la tabla 31, nos muestra una resistencia a 336.1 N en condición seca y de 304 N en condición húmeda, obteniendo una resistencia a tracción indirecta (TSR) de 90.5% y de acuerdo a la tabla 30, cumple los requisitos de la norma, para una mezcla asfáltica SMA.

4.1.2. Resultado de la deformación permanente de la mezcla SMA

4.1.2.1 Flujo de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar

Tabla 32:

Requisitos para mezcla de concreto bituminoso

Parámetro de diseño	Clase de mezcla		
	A	B	C
Compactación, número de golpes por lado	75	50	35
Estabilidad (mínimo)	8,15 kN	5,44 kN	4,53 kN
Flujo 0,01” (0,25 mm)	8-14	8-16	8-20
Porcentaje de vacíos con aire (MTC E 505)	3-5	3-5	3-5

Fuente: Comunicaciones, Especificaciones Técnicas Generales para Construcción, 2013

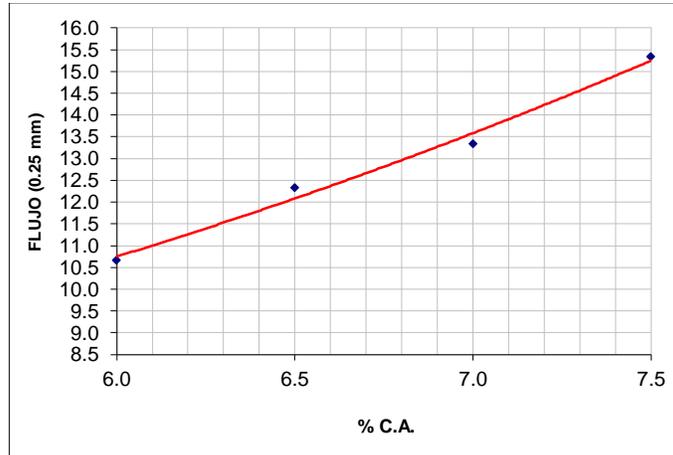


Figura 20: resultado del flujo de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar.

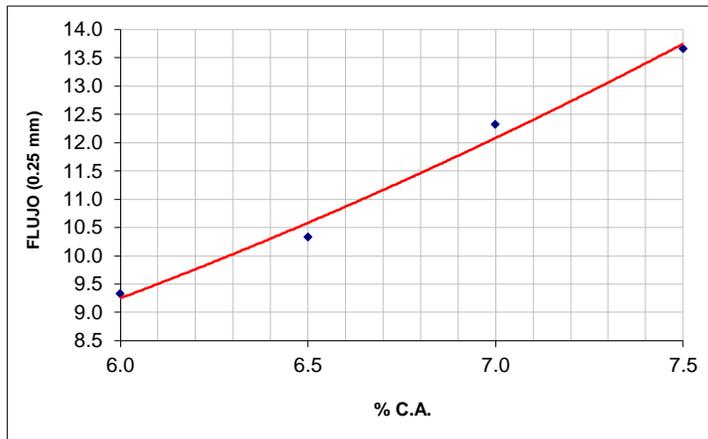


Figura 21: resultado del flujo de la mezcla asfáltica SMA con fibra celulosa y cal hidratada

Fuente: Elaboración propia

En la figura 20, se muestra el crecimiento del flujo de la mezcla producto del incremento del asfalto, fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar, se observa que la deformación de la mezcla modificada es mayor que la mezcla convencional

De acuerdo a la tabla 25, para el porcentaje óptimo de fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar en la mezcla asfáltica SMA, el flujo es de 13.6mm y el porcentaje de vacíos es de 3.5%, cumpliendo con los requisitos mínimos de la mezcla de concreto bituminoso de la tabla 32.

4.1.2.2 Deformación de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar

Profundidad final RUT.	: 12.50 Mm		
Tipo de medio térmico	: Agua		
Feedback utilizado	: En el tanque		
Temperatura máxima	: 50.4 °C		
Temperatura mínima	: 49.3 °C	Pasadas	: 15846

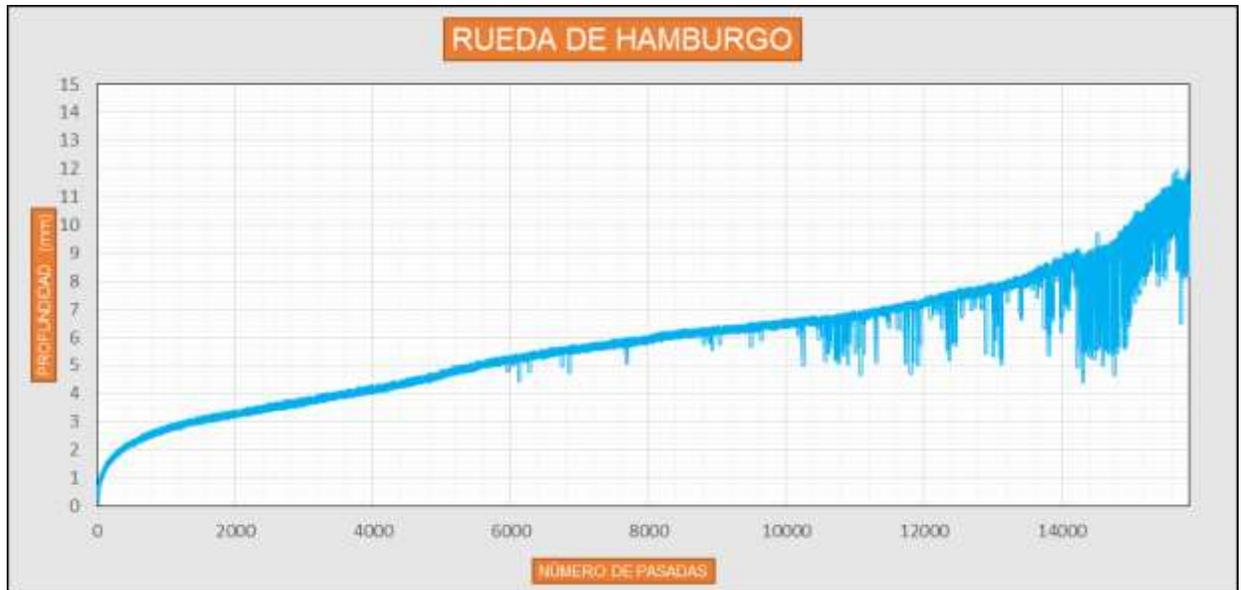


Figura 22: Diagrama de deformación permanente de la mezcla SMA con fibra y bagazo de caña de azúcar.

Fuente: Elaboración propia



Figura 23: resultado del ahuellamiento de la rueda cargada a la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar.

Fuente: Elaboración propia

Para los requisitos de la deformación permanente según AASHTO T -324 indica que “la muestra ensayada debe alcanzar 20000 pasadas de la rueda con un máximo de ahuellamiento de 12.5mm”.

De acuerdo a la figura 22, el ensayo de la deformación permanente de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar soporta 15846 pasadas con una profundidad de huella de 12.50 mm, que de acuerdo a la norma AASHTO T-324, no cumple con los requerimientos mínimos para ser una mezcla asfáltica SMA.

4.1.2.3 Deformación de la mezcla asfáltica SMA con celulosa y cal hidratada (convencional)

Profundidad final RUT. : 2.01 Mm
Tipo de medio térmico : Agua
Feedback utilizado : En el tanque
Temperatura máxima : 50.6 °C
Temperatura mínima : 49.2 °C Pasadas : 20000



Figura 24: Diagrama de deformación permanente de la mezcla SMA con celulosa y cal hidratada

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la figura 24, el ensayo de la deformación permanente de la mezcla asfáltica SMA con fibra celulosa y cal hidratada (convencional) soporta 20000 pasadas con una profundidad de huella de 2.01 mm, que de acuerdo a la norma AASHTO T-324 si cumple con los requerimientos mínimos para ser una mezcla asfáltica SMA.

4.1.3. Resultado de elasticidad de la mezcla asfáltica SMA

4.1.3.1 Estabilidad de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar

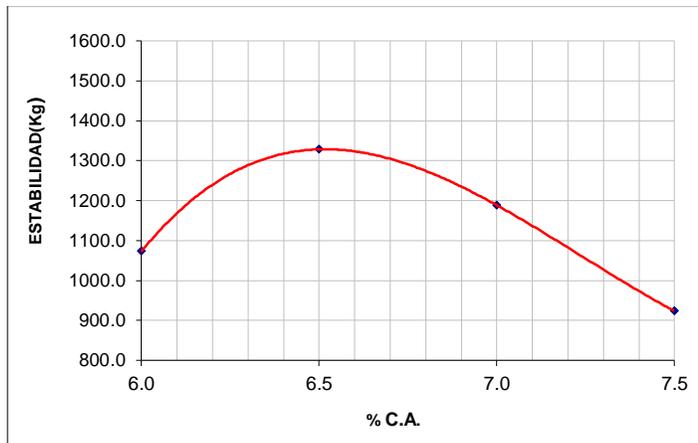


Figura 25: Estabilidad de la mezcla asfáltica modificada

Fuente: Elaboración propia

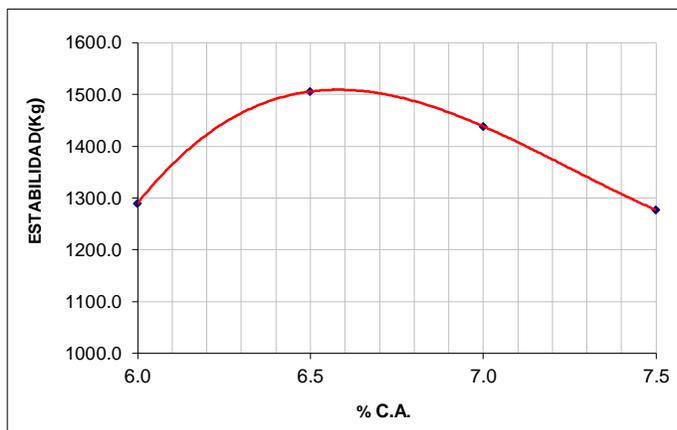


Figura 26: Estabilidad de la mezcla asfáltica convencional

Fuente: Elaboración propia

En la figura 25, muestra el acenso y descenso de la resistencia a la carga de la mezcla producto del incremento del asfalto, fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar, se observa que la resistencia de la mezcla modificada es menor que la mezcla convencional, en todos los porcentajes modificadas.

De acuerdo a la tabla 25, para el porcentaje óptimo de fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar en la mezcla asfáltica SMA, la estabilidad es de 1189 N y con una densidad de la briqueta de 2.292 kg/cm³, en comparación con la mezcla convencional tiene menor resistencia a la carga y menor densidad de la briqueta (ver tabla 27).

4.1.3.2 Módulo de resiliente de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar

Fecha y hora de inicio : 04/08/2020
 Pulsos de acondicionamiento : 5
 Temperatura del núcleo : 20.1 (°C)
 Temperatura de la superficie : 19.9 (°C)

Tabla 33:

Módulo resiliente de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar – espécimen 1

Resultados del ensayo	Pulso 1	Pulso 2	Pulso 3	Pulso 4	Pulso 5	Media	Desv. Stand.	% CV
Módulo resiliente (mpa)	3668	3568	3519	3470	3411	3527	87.72	2.49
Fuerza de carga pico (n)	1370	1492	1500	1497	1497	1471	50.84	3.46
Fuerza de asentamiento	20	21	23	26	22	22	2.25	9.99
Deformación total recuperable	3.82	4.28	4.36	4.41	4.49	4.27	0.24	5.54
Deformación horizontal recuperable #1 (µm)	1.96	2.15	2.06	2.18	2.30	2.13	0.12	5.41
Deformación horizontal recuperable #2 (µm)	1.86	2.13	2.30	2.24	2.19	2.14	0.15	7.15

Fuente: Elaboración propia

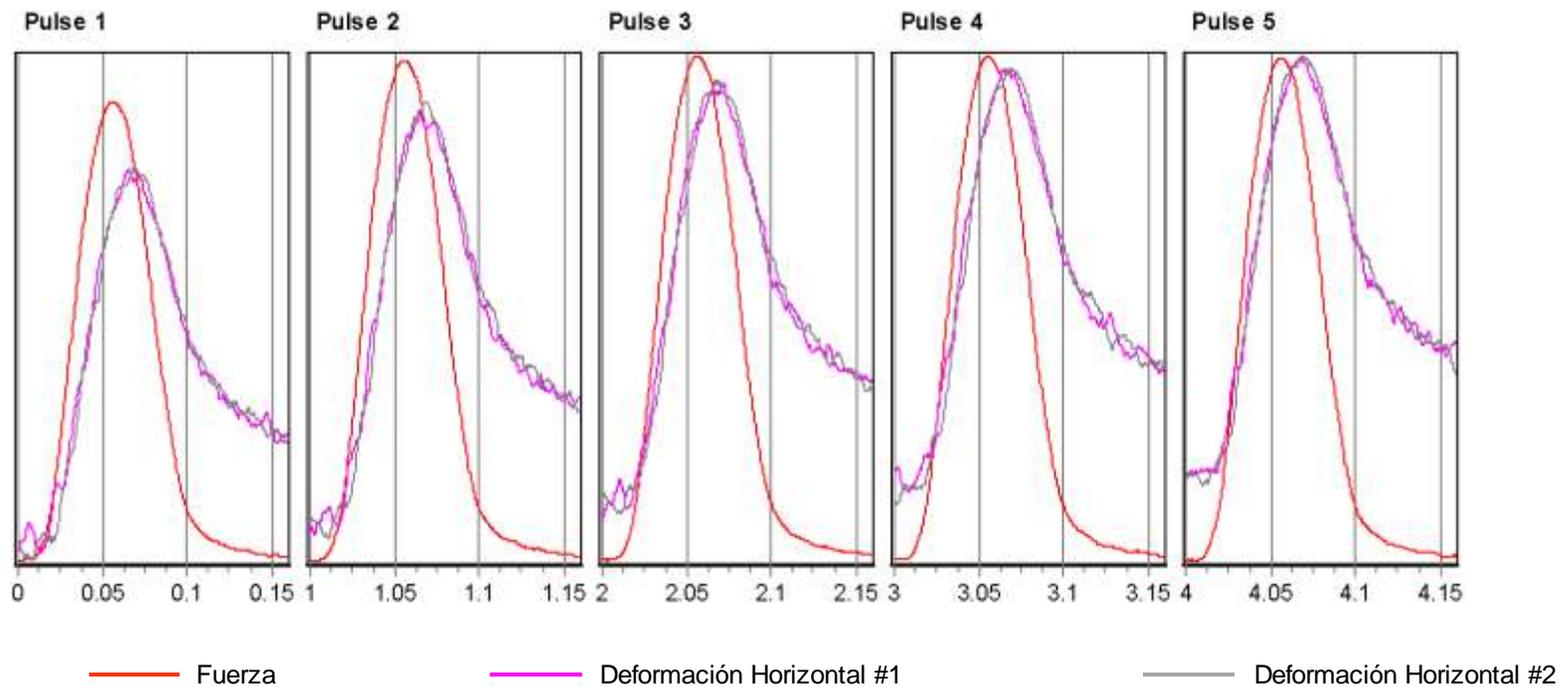


Figura 27: Diagrama del módulo resiliente de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar – espécimen 1.

Fuente: Elaboración propia

Fecha y hora de inicio	:	04/08/2020
Pulsos de acondicionamiento	:	5
Temperatura del núcleo	:	20 (°C)
Temperatura de la superficie	:	19.6 (°C)

Tabla 34:

Módulo resiliente de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar – espécimen 2

Resultados del ensayo	Pulso 1	Pulso 2	Pulso 3	Pulso 4	Pulso 5	Media	Desv. Stand.	% CV
Módulo resiliente (Mpa)	3724	3672	3610	3574	3481	3612	83.20	2.30
Fuerza de carga pico (N)	1364	1485	1503	1495	1496	1469	52.70	3.59
Fuerza de asentamiento	23	27	24	27	23	25	1.69	6.79
Deformación total recuperable	3.74	4.13	4.25	4.27	4.39	4.16	0.22	5.38
Deformación horizontal recuperable #1 (µm)	1.48	2.16	1.75	2.16	1.73	1.86	0.27	14.32
Deformación horizontal recuperable #2 (µm)	2.26	1.97	2.51	2.11	2.66	2.30	0.25	10.96

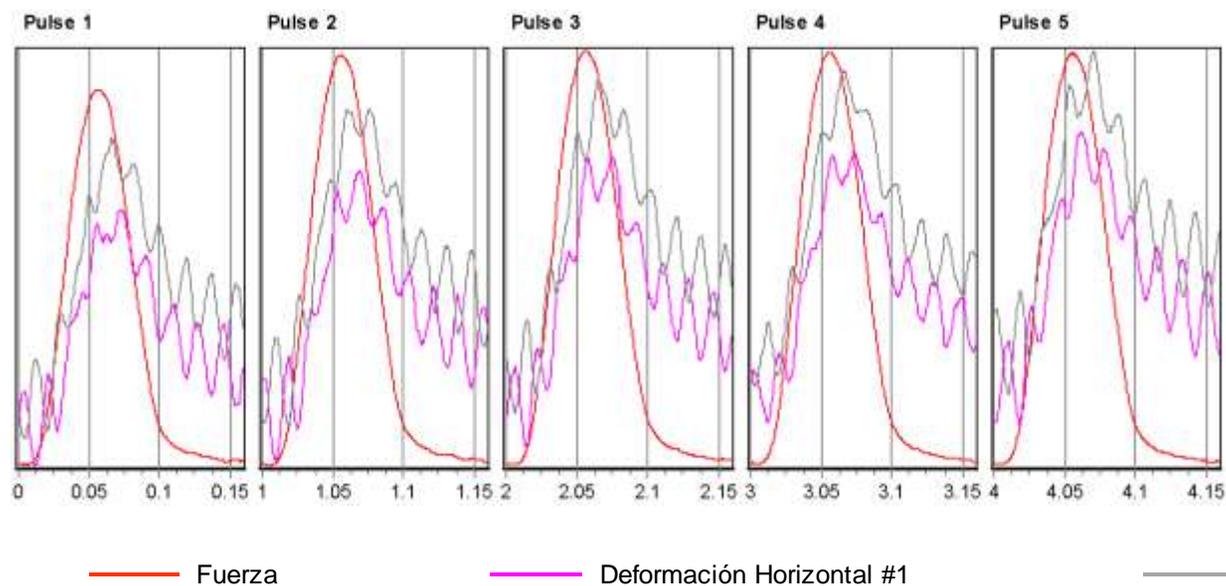


Figura 28: Diagrama del módulo resiliente de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar – espécimen 2.

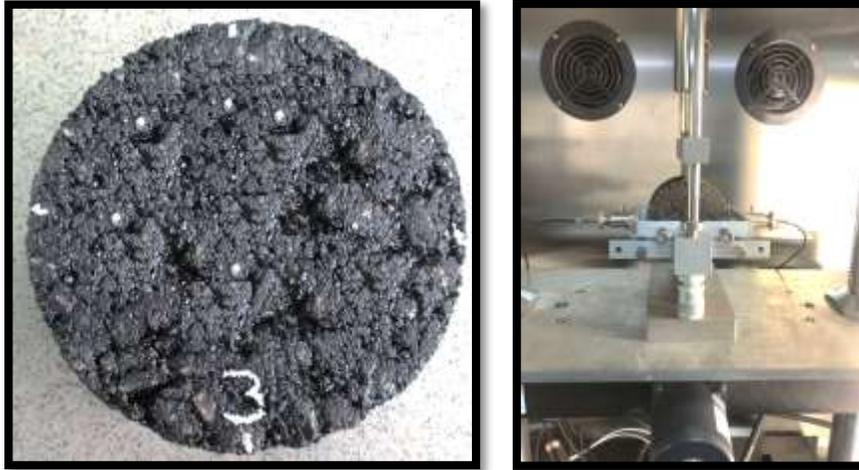


Figura 29: resultado del ensayo de módulo resiliente.

Fuente: Elaboración propia

Se realizaron dos muestras de módulo resiliente a la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza de bagazo de caña de azúcar y también a la mezcla convencional, para el análisis de resultado se va utilizar el que tenga menor coeficiente de variación de cada mezcla. El módulo de resiliencia 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 la tabla 34, la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar fue sometida a un ensayo de módulo de resiliente teniendo como resultado de 3612 Mpa, con una fuerza de carga de 1469 N y una deformación total recuperable de 4.16 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.

4.1.3.3 Módulo de resiliente de la mezcla asfáltica SMA con celulosa y cal hidratada (convencional)

Fecha y hora de inicio : 04/08/2020
 Pulsos de acondicionamiento : 5
 Temperatura del núcleo : 20 (°C)
 Temperatura de la superficie : 20.4 (°C)

Tabla 35:

Módulo resiliente de la mezcla asfáltica SMA con celulosa y cal hidratada – espécimen 1.

Resultados del ensayo	Pulso 1	Pulso 2	Pulso 3	Pulso 4	Pulso 5	Media	Desv. Stand.	% CV
Módulo resiliente (mpa)	6430	6215	6361	6083	6131	6244	132.42	2.12
Fuerza de carga pico (n)	1387	1495	1500	1491	1491	1473	43.13	2.93
Fuerza de asentamiento	20	20	26	31	31	26	4.79	18.75
Deformación total recuperable	2.23	2.48	2.43	2.53	2.51	2.44	0.11	4.53
Deformación horizontal recuperable #1 (µm)	0.98	1.17	1.15	1.23	1.20	1.15	0.09	7.67
Deformación horizontal recuperable #2 (µm)	1.25	1.31	1.28	1.30	1.31	1.29	0.02	1.81

Fuente: Elaboración propia

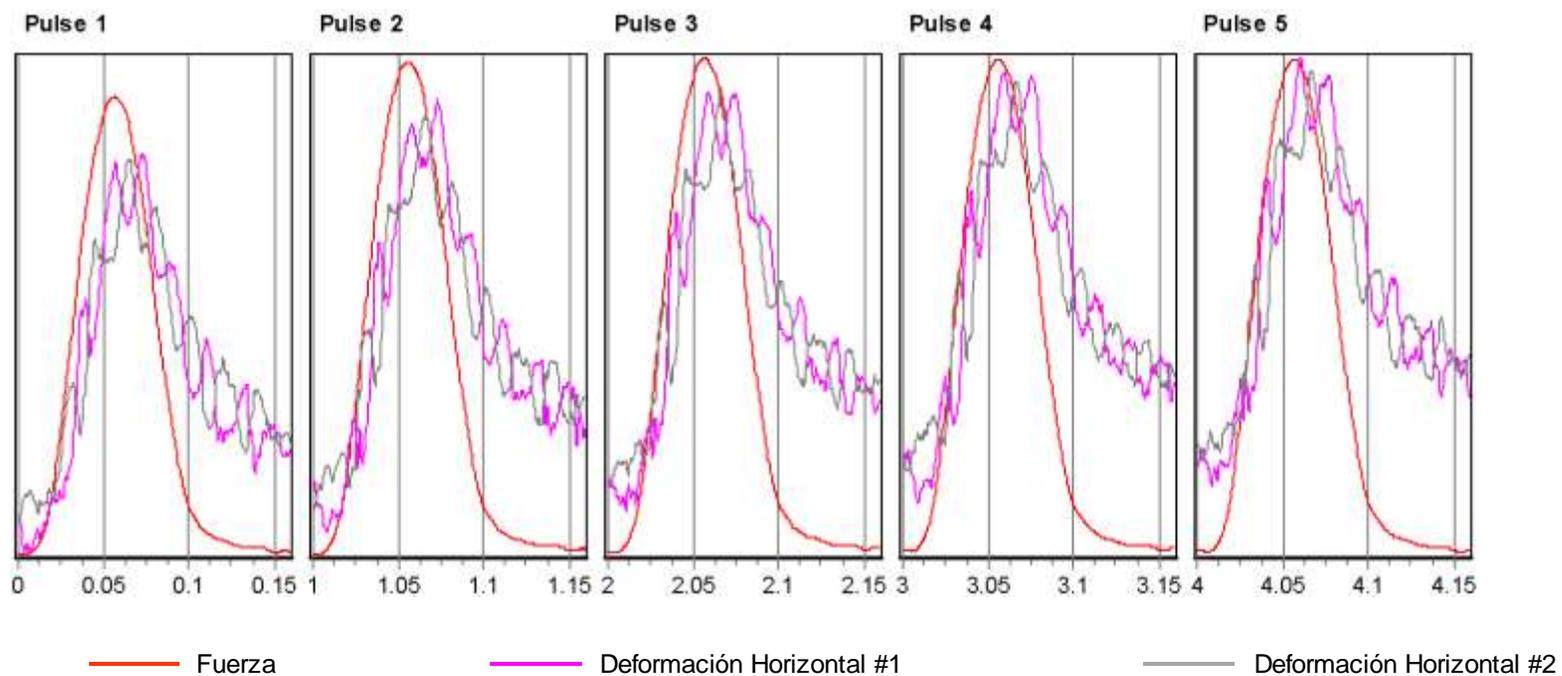


Figura 30: Diagrama del módulo resiliente de la mezcla asfáltica SMA con celulosa y cal hidratada – espécimen 1.

Fuente: Elaboración propia

Fecha y hora de inicio	:	04/08/2020
Pulsos de acondicionamiento	:	5
Temperatura del núcleo	:	20.1 (°C)
Temperatura de la superficie	:	20.1 (°C)

Tabla 36:

Módulo resiliente de la mezcla asfáltica SMA con celulosa y cal hidratada – espécimen 2.

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)	1398	1497	1498	1497	1492	1477	39.09	2.65
Fuerza de asentamiento	21	21	22	27	30	24	3.64	14.95
Deformación total recuperable	2.34	2.63	2.63	2.65	2.71	2.59	0.13	5.03
Deformación horizontal recuperable #1 (µm)	1.27	1.46	1.43	1.69	1.51	1.47	0.14	9.35
Deformación horizontal recuperable #2 (µm)	1.07	1.17	1.20	0.96	1.19	1.12	0.09	8.43

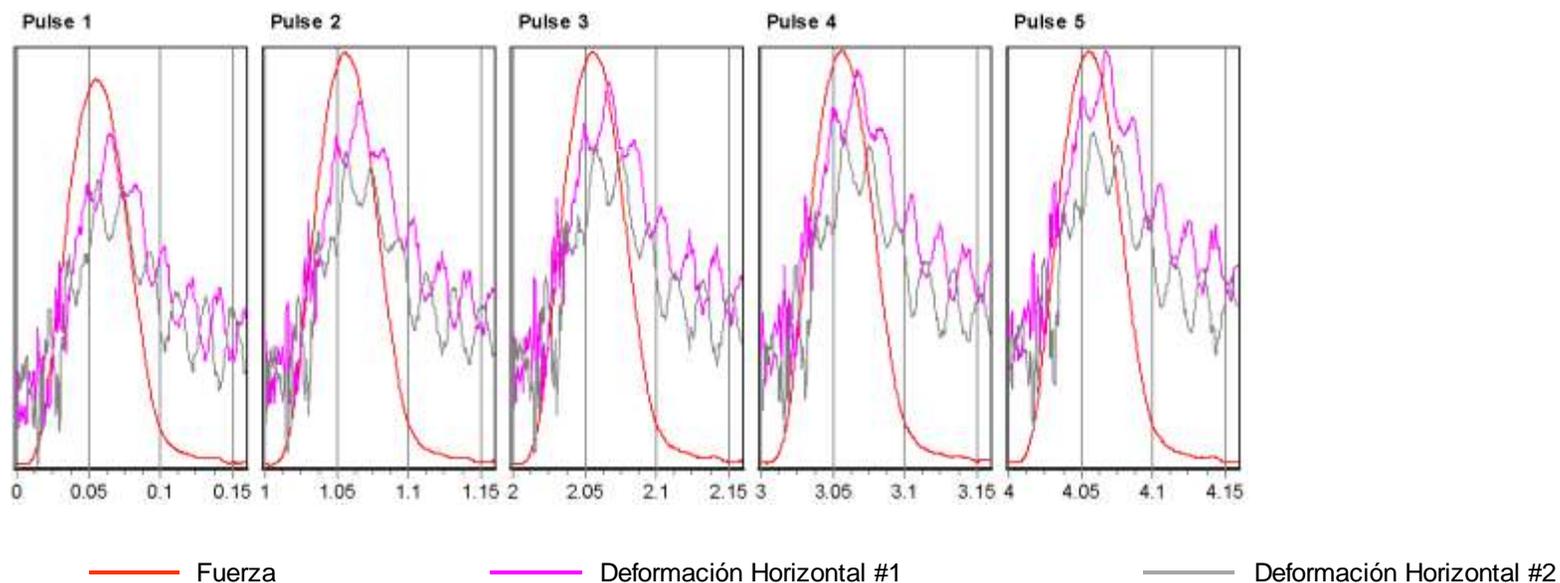


Figura 31: Diagrama del módulo resiliente de la mezcla asfáltica SMA con celulosa y cal hidratada – espécimen 2.

De acuerdo a la tabla 35, la mezcla asfáltica SMA con fibra celulosa y cal hidratada (convencional), fue sometida a un ensayo de módulo de resiliente teniendo como resultado de 6244Mpa, con una fuerza de carga de 1473 y una deformación total recuperable de 2.44 μm , es un resultado favorable superando considerablemente a los requisitos mínimos de módulo resiliente de 2965Mpa 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.

4.2. Análisis de los resultados o discusión de resultados

4.2.1. Análisis de resultados al daño inducido por la humedad.

Tabla 37:

Resultado del ensayo de traccion indirecta - Lottman Modificado

Mezcla Asfáltica SMA	Escurrecimiento	Validación	TSR%	Validación
fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar	0.22	Si cumple	63%	No cumple
Convencional	0.25	Si cumple	90.5%	Si cumple

Fuente: Elaboración propia

Analizando ambas mezclas de la tabla 37, resulta que la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar resulta inferior en un 30.38% de TSR, referente a la mezcla asfáltica convencional.

Para obtener un material cementante se requiere la combinación del hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ más el dióxido de silicio SiO_2 , en el caso de la ceniza del bagazo de caña tiene mucha cantidad dióxido de silicio y carece de óxido de calcio CaO (ver tabla 6), por eso la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del

bagazo de caña de azúcar no tiene una buena adherencia. En cambio la mezcla asfáltica SMA convencional si cuenta con los dos componentes químicos que resulta tener una buena adherencia.

Aduto (2019) afirma que “0.5% de ceniza de caña de maíz en adición a la mezcla asfáltica con diseño Marshall llega a un valor máximo de TSR con 86.2%”. Se sabe que para un diseño marshall se utiliza una granulometría continua, contenido de asfalto, la investigadora esta adicionando la ceniza de caña de maíz y por eso incrementa la adherencia. En cambio para un diseño de mezcla SMA se requiere una granulometría discontinua, fibra, filler y contenido de asfalto, para la investigación se está modificando el uso de la fibra y el filler convencional por la fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar.

4.2.2. Análisis de resultados de la deformación permanente

Tabla 38:

Resultado del ensayo de rueda cargada de Hamburgo

Mezcla Asfáltica SMA	Flujo	Validación	N° de pasadas	Profundidad de huella	Validación
fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar	13.6	Si cumple	15846	12.50mm	No cumple
Convencional	12.1	Si cumple	20000	2.01	Si cumple

Fuente: Elaboración propia

Analizando ambas mezclas de la tabla 38, resulta que la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar resulta inferior en un 20.77% en números de pasadas, referente a la mezcla asfáltica convencional.

Las mezclas fueron ensayadas sumergida en agua y bajo una temperatura de 50°C ensayando en situaciones que va estar expuesta la mezcla asfáltica, resultando una deformación de 12.5mm de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar a consecuencia de no tener mucha adherencia y tener un mayor flujo.

Según Peña, (2019) afirma que “para incorporaciones del 0.75% de cenizas volantes al 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, en comparación con nuestra mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza de bagazo de caña de azúcar estamos en un 20% menos del número de pasadas.

4.2.3. Análisis de resultado de elasticidad

Tabla 39:

Resumen de resultado de elasticidad - ensayo módulo resiliente

Mezcla Asfáltica SMA	Estabilidad (kg)	Ensayo	Módulo resiliente (Mpa)	Fuerza de Carga (N)	Deformación total recuperable (µm)
fibra y ceniza		Promedio	3612	1469	4.16
del bagazo de	1189	Desv. Stand	83.2	52.7	0.22
caña de azúcar		CV%	2.3	3.59	5.38
		promedio	6244	1473	2.44
Convencional	1437	Desv. Stand	132.42	43.13	0.11
		CV%	2.12	2.93	4.53

Fuente: Elaboración propia

Analizando ambas mezclas de la tabla 39, la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar resulta ser inferior en un 42.15% de módulo resiliente, en 0.27% de fuerza de carga y produce una mayor deformación recuperable en un 70% respecto a la mezcla asfáltica SMA 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”. En comparación con nuestro diseño a 20°C, la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar le supera considerablemente en un 42.44% de módulo resiliente, en 0.23% en la fuerza de carga y tiene una menor deformación recuperable.

4.3. Análisis descriptivo y prueba de hipótesis

4.3.1. Hipótesis general

H0: El diseño de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar, no mejora el desempeño mecánico, a través de ensayos de laboratorio.

H1: El diseño de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar, mejora el desempeño mecánico, a través de ensayos de laboratorio.

Se acepta la hipótesis nula a un 95% de confiabilidad, porque en el ensayo de deformación (ver figura 22 y 24) se muestra que la mezcla convencional es más homogéneo en comparación con la mezcla modificada, lo mismo sucede en el ensayo de módulo de resiliencia (ver tabla 34 y 35) que la mezcla convencional tiene una menor coeficiente de variación en comparación con la mezcla modificada.

4.3.2. Hipótesis específica 1

Para el procesamiento de los datos tanto del grupo celulosa y cal hidratada (convencional) considerado también como grupo de control y los datos del resultado fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar (Experimental).

En la Estadística Descriptiva se presenta los resultados de las medidas de tendencia central: la media, mediana la moda y en la medida de dispersión la varianza, desviación estándar también como las medidas percentiles, cuartiles y el coeficiente de variación.

Para analizar la variabilidad o la homogeneidad de los datos tanto del grupo de control como del grupo experimental se ha tenido en cuenta el coeficiente variación, siendo el más homogéneo aquel que tenga el menor valor expresado en porcentaje, por lo que se presenta los resultados en cada uno de los resultados tanto del grupo de control como del grupo experimenta.

Hipótesis específica 1: La reducción del escurrimiento de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar, reduce la susceptibilidad al daño por humedad, a través del ensayo AASHTO T-283.

4.3.2.1 Análisis descriptivo del daño por humedad - Estado seco STD.

a. Mezcla asfáltica SMA con celulosa y cal hidratada: Seco STD

De la tabla 31 se obtienen los datos para el análisis estadístico descriptivo, es un resultado en fuerza (newton) no condicionado.

Descriptive Statistics: Mezcla Convencional Seco STD.

Variable	N	N*	Percent	Mean	SE Mean	St Dev	Variance	CoefVar	Q1
Convencional seco STD	3	0	100	336.10	3.07	5.32	28.33	1.58	332.40

Variable	Median	Q3	Mode	Nfor Mode	Kurtosis
Convencional seco STD	333.70	342.20	*	0	*

**b. Mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar :
Seco STD**

De la tabla 29 se obtienen los datos para el análisis estadístico descriptivo, es un resultado en fuerza (newton) no condicionado.

Descriptive Statistics: Mezcla Experimental Seco STD.

Variable	N	N*	Percent	Mean	SE Mean	St Dev	Variance	CoefVar	Q1
Convencional seco STD	3	0	100	292.00	3.69	6.39	40.87	2.19	284.70

Variable	Median	Q3	Mode	Nfor Mode	Kurtosis
Convencional seco STD	294.70	296.60	*	0	*

Interpretación de los resultados descriptivos: Mezcla asfáltica SMA con celulosa y cal hidratada: Seco STD y la Mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar: Seco STD.

Para comparar cuando se analiza dos o más grupos su grado de dispersión u homogeneidad de sus datos es el coeficiente de variación, siendo considerado el que tenga menor valor en porcentaje, el más homogéneo o grupo que tenga menor dispersión.

	Mezcla	Mezcla
	Convencional	Experimental
	Seco STD	Seco STD
% Coeficiente Variación	1.58	2.19

Se muestra que el convencional seco STD presenta sus datos menos dispersos con respecto a su media aritmética porque es menor con respecto al grupo experimental seco STD.

4.3.2.2 Análisis Inferencial del daño por humedad - Estado seco STD.:

Formulación de hipótesis estadística:

μ_1 : Promedio Convencional : Seco(STD)

μ_2 : Promedio Experimental : Seco(STD)

Nivel significación: $\alpha=0,05$

H_0 : $\mu_1 = \mu_2$

H_1 : $\mu_1 \neq \mu_2$

Estadística de Prueba:

Como $n_1+n_2 \leq 30$, no se conoce las varianzas de la población pero se tiene las varianzas muestrales cumple los requisitos para utilizar la prueba estadística de T-Student.

$$t_{cal} = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}; \quad s_p^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

$$t_{tabla} \left(1 - \frac{\alpha}{2}; n_1 + n_2 - 2\right)$$

Para calcular el valor de T-Student se utilizó el software MINITAB 19

Two-Sample T-Test and CI

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
1	3	336.10	5.32	3.1
2	3	292.00	6.39	3.7

Difference = μ (1) - μ (2)

Estimate for difference: 44.10

95% CI for difference: (28.82; 59.38)

T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = 9.18 **P-Value = 0.003** DF = 3

Regla de Decisión

Condición para rechazar H_0

Valor P	<	α	Decision
0,003	<	0.05	Rech. H_0

Conclusión:

Habiendo procesado los datos con el Software MINITAB versión 19, en los resultados se observa que el valor de $P=0,003$ es menor $\alpha=0,05$ por lo que rechazamos la hipótesis nula en consecuencia concluimos que existe diferencia entre las dos medias.

4.3.2.3 Análisis descriptivo del daño por humedad - Estado húmedo STM.

a. Mezcla asfáltica SMA con celulosa y cal hidratada: Húmedo STM

De la tabla 31 se obtienen los datos para el análisis estadístico descriptivo, es un resultado en fuerza (newton) condicionado.

Descriptive Statistics: Mezcla Convencional Humeda STM

Variable	N	N*	Percent	Mean	SE	St	Variance	CoefVar	Q1
Convencional seco STD	3	0	100	304.27	1.25	2.16	4.66	0.71	302.00
Variable	Median	Q3	Mode	Nfor	Mode	Kurtosis			
Convencional seco STD	304.50	306.30	*	0	*				

**b. Mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar:
Húmedo STM**

Descriptive Statistics: Mezcla Experimental Humeda STM

Variable	N	N*	Percent	Mean	SE	St	Variance	CoefVar	Q1
Convencional seco STD	3	0	100	184.10	0.693	1.20	1.44	0.65	182.90
Variable	Median	Q3	Mode	Nfor	Mode	Kurtosis			
Convencional seco STD	184.10	185.30	*	0	*				

Interpretación de los resultados descriptivos: Mezcla asfáltica SMA con celulosa y cal hidratada: Húmedo STM y Mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar: Húmedo STM.

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	Mezcla
	Convencional	Experimental
	Húmedo STD	Húmedo STD
% Coeficiente Variación	0.71	0.65

Se muestra que el experimental Húmedo STM presenta sus datos menos dispersos con respecto a su media aritmética porque es menor su coeficiente variación expresado en porcentaje con respecto al grupo Convencional Húmedo STM

4.3.2.4 Análisis inferencial del daño por humedad - Estado húmedo STM.

Formulación de hipótesis estadística:

μ_1 : *Promedio Convencional : Húmedo (STM)*

μ_2 : *Promedio Experimental : Húmedo (STM)*

Nivel significación: $\alpha=0,05$

H_0 : $\mu_1 = \mu_2$

H_1 : $\mu_1 \neq \mu_2$

Estadística de Prueba:

Como $n_1+n_2 \leq 30$, no se conoce las varianzas de la población pero se tiene las varianzas muestrales cumple los requisitos para utilizar la prueba estadística de T-Student.

Estadística de Prueba:

$$t_{cal} = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}; \quad s_p^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

$$t_{\text{tabla}} \left(1 - \frac{\alpha}{2}; n_1 + n_2 - 2\right)$$

Para calcular el valor de T-Student se utilizó el software MINITAB 19

Two-Sample T-Test and CI

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
1	3	304.27	2.16	1.2
2	3	184.10	1.20	0.69

Difference = μ (1) - μ (2)

Estimate for difference: 120.17

95% CI for difference: (115.63; 124.71)

T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = 84.23 **P-Value = 0.000** DF = 3

Regla de Decisión

Condición para rechazar H_0 ,

Valor P	<	α	Decision
0,000	<	0.05	Rech. H_0

Conclusión:

Habiendo procesado los datos con el Software MINITAB versión 19 en los resultados se observa que el valor de $P=0,000$ es menor $\alpha=0,05$ por lo que rechazamos la hipótesis nula en consecuencia concluimos que existe diferencia significativa entre los dos promedios.

4.3.2.5 Análisis de correlación del daño por humedad - Estado seco STD y húmedo STM.:

Para analizar la relación entre Convencional Seco (STD) versus Convencional Húmedo (STM), se va analizar con la Correlación PEARSON para datos cuantitativos, utilizando el software MINITAB 19 se obtiene el siguiente resultado:

Correlation: Mezcla convencional Seco STD; Mezcla convencional: Húmedo STM. Pearson correlation of Convencional: Seco STD and Convencional: Húmedo STM = 0.880

Se observa que: $\rho = 0,880$ teniendo en cuenta la teoría de correlación concluimos que existe una correlación buena entre Convencional Seco (STD) y Húmedo (STM)

Correlation: Mezcla experimental: Seco STD; Mezcla experimental: Húmedo STM

Pearson correlation of Experimental: Seco STD and Experimental: Húmedo STM = -0.149

En el análisis correlacional de la mezcla convencional húmedo (STM) versus la Mezcla experimental húmedo (STM), se observa: $\rho = -0,149$ de acuerdo a la teoría de correlación Pearson es una correlación negativa es decir una relación inversa teniendo una correlación muy baja la que implica la relación entre estas dos variables en baja que no permite hacer las estimaciones entre las dos variables

4.3.2.6 Contraste de normalidad del daño por humedad de la mezcla SMA experimental y convencional.

El hecho de que las variables tenga una distribución normal nos resulta muy útil para extraer información sobre sus propiedades. También nos permite realizar algunos test estadísticos para contrastar las hipótesis.

Prueba de SHAPIRO – WILKS

La prueba de SHAPIRO – WILKS se utiliza para contrastar la hipótesis planteada si el dato obtenido de la muestra proviene de una distribución normal,

siendo uno de los requisitos que el tamaño de la muestra debe ser menor de 50 ($n < 50$), si el tamaño de muestra es mayor o igual de 50 ($n \geq 50$) se utiliza la prueba de normalidad de Kplmogorov – Smirnov.

Para analizar la normalidad de los datos de la muestra tanto del grupo de control como de la experimental en la presente tesis se utiliza la prueba de SHAPIRO – WILKS, por que los tamaños de la muestra son menores de 50 ($n < 50$). Para calcular la normalidad de los datos de la muestra a través de la prueba de SHAPIRO – WILKS, se va utilizar el software SPSS versión 21.

Prueba Estadística mezcla asfáltica SMA seco (STD) y húmedo (STM)

H₀: Los datos de la variable daños por humedad de la mezcla asfáltica SMA Seco (STD), Húmedo (STM) del grupo de control y experimental proviene de una distribución normal.

H₁: Los datos de la variable daños por humedad de la mezcla asfáltica SMA Seco (STD), Húmedo (STM) del grupo de control y experimental NO proviene de una distribución normal.

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

P – Valor calculado con software SPSS versión 21

Tabla 40:

Prueba de normalidad del daño por humedad de la mezcla SMA experimental y convencional

	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Daño por humedad de la mezcla SMA (Grupo Control) Seco STD	0,848	3	0,234
Daño por humedad de la mezcla SMA (Grupo Control) Humedo STM	0,991	3	0,821

Daño por humedad de la mezcla SMA (Grupo Experimental) Seco STD	0,866	3	0,285
Daño por humedad de la mezcla SMA (Grupo Experimental) Húmedo STM	1,000	3	1,000

Fuente: Elaboración propia

Los valores de p calculado con el software SPSS como se muestra en la tabla 40, para cada uno de las variables son:

0,234; 0,821; 0,285; 1,00

Decisión: si $p > \alpha$ ($p > 0,05$), No se rechaza la hipótesis nula (H_0) en otras palabras aceptamos la hipótesis nula, caso contrario si $p < \alpha$ ($p < 0,05$) rechazamos la hipótesis nula, aceptando la hipótesis alterna.

Conclusión: Comparando cada uno de los valores de p calculado con software SPSS que se muestra en la tabla con el valor de $\alpha = 0,05$ se observa que todas ellas son mayores que 0,05; por lo que no se rechaza la hipótesis nula concluyendo: Los datos de la variable daños por humedad de la mezcla asfáltica SMA Seco (STD), Húmedo (STM) del grupo de control y experimental proviene de una distribución normal

4.3.3. Hipótesis específica 2

Hipótesis específica 2: La reducción del flujo de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar, disminuye la susceptibilidad a la deformación permanente, a través del ensayo AASHTO T – 324.

Como se puede apreciar en la figura 24, se muestra que la mezcla convencional es más homogéneo y menos disperso en comparación con la mezcla modificada (ver figura 22), donde que la mezcla convencional cumple con todos los requisitos de la normativa, en cambio la mezcla modificada no cumple con los requisitos mínimos solicitado, no llegando a alcanzar las 20000 mil pasadas. Dichas figuras mencionadas demuestran que la mezcla modificada no llega a cumplir con la normativa, fallando con 15846 pasadas con una profundidad de ruptura de 12.5 mmm.

4.3.4. Hipótesis específica 3

Hipótesis específica 3: El incremento de la estabilidad de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar, mejora la elasticidad, a través del ensayo AASHTO TP – 31.

4.3.4.1 Análisis descriptivo de elasticidad – Modulo resiliente

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

Para el análisis del módulo resiliente se utilizó la tabla 35 y 36, donde se encuentran los datos para el análisis estadístico descriptivo.

Tabla 41:
Análisis convencional del módulo resiliente

		Mezcla Convencional: Módulo Resiliente (MPA) Espécimen1	Mezcla Convencional: Módulo Resiliente (MPA) Espécimen 2
N	Válido	5	5
	Perdidos	0	0
Media		6244,00	5890,80
Mediana		6215,00	5872,00
Moda		6083 ^a	5687 ^a
Desv. Desviación		148,169	178,815
Varianza		21954,000	31974,700
C.Vx100%		2,37	3,04

Asimetría	0,307	1,116
Error estándar de asimetría	0,913	0,913
Curtosis	-2,243	2,554
Error estándar de curtosis	2,000	2,000

Fuente: Elaboración propia

b. Análisis Experimental: Módulo Resilente (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 42:

Análisis experimental del módulo resiliente

		Mezcla Experimental: Módulo Resiliente(MPA) Espécimen 1	Mezcla Experimental: Módulo Resiliente(MPA) Espécimen 2
N	Válido	5	5
	Perdidos	0	0
Media		3527,20	3612,20
Mediana		3519,00	3610,00
Moda		3411 ^a	3481 ^a
Desv. Desviación		97,891	93,211
Varianza		9582,700	8688,200
C.Vx100%		2,76	2,58
Asimetría		0,490	-0,362
Error estándar de asimetría		0,913	0,913
Curtosis		0,015	-,259
Error estándar de curtosis		2,000	2,000

Fuente: Elaboración propia

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	Mezcla Experimental: Espécimen
	Módulo Resilente (MPA)	Módulo Resilente (MPA)
Coeficiente de Variaciónx100%	2,37	2,58

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

4.3.4.2 Análisis inferencial de elasticidad – Modulo resilente.

Para analizar si existen diferencias entre sus promedios de Módulo de resilente de la mezcla asfáltica SMA con celulosa y cal hidratada (convencional), comparada con el Módulo de resilente de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar (experimental), formulamos la siguiente hipótesis.

μ_1 : Promedio de módulo de resilente de la mezcla asfáltica convencional

μ_2 : Promedio de módulo de resilente de la mezcla asfáltica experimental

Hipótesis Estadística

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

Asumo el nivel de significación $\alpha = 0,05$

n_1 : tamaño de muestra convencional $n_1=5$

n_2 : tamaño de muestra experimental $n_2=5$

Como $n_1+n_2 \leq 30$, no se conoce las varianzas de la población pero se tiene las varianzas muestrales cumple los requisitos para utilizar la prueba estadística de T-Student.

Estadística de Prueba:

$$t_{cal} = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}; \quad s_p^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

$$t_{tabla} \left(1 - \frac{\alpha}{2}; n_1 + n_2 - 2\right)$$

Para calcular el valor de T-Student se utilizó el software MINITAB 19

Two-Sample T-Test and CI

Sample	N	Mean	StDev	SEMean
1	5	6244	148	66
2	5	3612.2	93.2	42

Difference = μ (1) - μ (2)

Estimate for difference: 2631.8

95% CI for difference: (2440.2; 2823.4)

T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = 33.62 P-Value = **0.000** DF = 6

Conclusion:

Valor P	<	α	Decision
0,000	<	0.05	Rech. H ₀

El valor de $p=0,000 < \alpha=0,05$ rechazamos la hipótesis nula (H₀) por lo que concluimos existe diferencias significativas entre el promedio de módulo de resilente de la mezcla asfáltica (convencional) y el promedio de módulo de resilente de la mezcla asfáltica (experimental).

4.3.4.3 Análisis descriptivo de elasticidad – Deformación total recuperable

a. Análisis Convencional: Espécimen Deformación Total Recuperable

Para el análisis de la deformación total recuperable se utilizó la tabla 35 y 36, donde se encuentran los datos para el análisis estadístico descriptivo.

Tabla 43:
Análisis convencional de la deformación total recuperable

		Mezcla Convencional: Espécimen1 Deformación Total Recuperable	Mezcla Convencional: Espécimen2 Deformación Total Recuperable
N	Válido	5	5
	Perdidos	0	0
Media		2,4360	2,5920
Mediana		2,4800	2,6300
Moda		2,23 ^a	2,63
Desv. Desviación		0,12116	0,14464
Varianza		0,015	0,021
C:Vx100%		4,37	5,58
Asimetría		-1,738	-1,935
Error estándar de asimetría		0,913	0,913
Curtosis		3,094	4,116
Error estándar de curtosis		2,000	2,000

Fuente: Elaboración propia

b. Análisis Experimental: Espécimen Deformación Total Recuperable

Para el análisis de la deformación total recuperable se utilizó la tabla 33 y 34, donde se encuentran los datos para el análisis estadístico descriptivo.

Tabla 44:
Análisis experimental de la deformación total recuperable

		Mezcla Experimental: Espécimen1 Deformación Total Recuperable	Mezcla Experimental: Espécimen2 Deformación Total Recuperable
N	Válido	5	5
	Perdidos	0	0
Media		4,2720	4,1560
Mediana		4,3600	4,2500
Moda		3,82 ^a	3,74 ^a
Desv. Desviación		0,26395	0,25016
Varianza		0,070	0,063
C.Vx100%		6,18	6,02
Asimetría		-1,783	-1,514
Error estándar de asimetría		0,913	0,913
Curtosis		3,440	2,595
Error estándar de curtosis		2,000	2,000

Fuente: Elaboración propia

Interpretación de los resultados descriptivos: Mezcla convencional: Espécimen1 Deformación Total Recuperable y Mezcla experimental: Espécimen1 Deformación Total Recuperable

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.

	Convencional: Espécimen deformación Total Recuperable	Experimental: Espécimen deformación Total Recuperable
Coefficiente de Variaciónx100%	4,37	6,02

Concluimos, existe menos dispersión de los datos con respecto a su promedio en la mezcla convencional: Espécimen deformación Total Recuperable

4.3.4.4 Análisis inferencial de elasticidad – Deformación total recuperable.

Para analizar si existen diferencias entre sus promedios de la deformación total recuperable de la mezcla asfáltica SMA con celulosa y cal hidratada (convencional), comparando con la deformación total recuperable de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar (experimental), formulamos la siguiente hipótesis.

μ_1 : Promedio de módulo de la Deformación Total Recuperable (convencional)

μ_2 : Promedio de módulo de la Deformación Total Recuperable (Experimental)

Hipótesis Estadística

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

Asumo el nivel de significación $\alpha = 0,05$

n_1 : tamaño de muestra convencional $n_1=5$

n_2 : tamaño de muestra experimental $n_2=5$

Como $n_1+n_2 \leq 30$, no se conoce las varianzas de la población pero se tiene las varianzas muestrales cumple los requisitos para utilizar la prueba estadística de T-Student.

Estadística de Prueba:

$$t_{cal} = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}; \quad s_p^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

$$t_{tabla} \left(1 - \frac{\alpha}{2}; n_1 + n_2 - 2\right)$$

Para calcular el valor de T-Student se utilizó el software MINITAB 19

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
1	5	2.436	0.122	0.054
2	5	4.156	0.252	0.11

Difference = μ (1) - μ (2)

Estimate for difference: -1.720

95% CI for difference: (-2.041; -1.399)

T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = -13.76 P-Value = 0.000 DF = 5

Conclusion:

Valor P	<	α	Decision
0,000	<	0.05	Rech. H ₀

Como el valor de $p=0,000 < \alpha=0,05$ rechazamos la hipótesis nula (H₀) por lo que concluimos existe diferencias significativas entre el promedio de módulo de la deformación total recuperable (convencional) y promedio de módulo de la deformación total recuperable (experimental)

4.3.4.5 Contraste de normalidad del módulo resilente y deformación total recuperable de la mezcla SMA experimental y convencional.

Prueba Estadística mezcla asfáltica SMA del módulo resilente y deformación total recuperable:

H₀: Los datos de la variable módulo resilente (MPA), deformación total del Espécimen 1, módulo resilente (MPA), deformación total del espécimen 2 del grupo convencional y Los datos de la variable módulo resilente (MPA),

deformación total del Espécimen 1, módulo resiliente (MPA), deformación total del espécimen 2 del grupo experimental provienen de una distribución normal.

H₁: Los datos de la variable módulo resiliente (MPA), deformación total del Espécimen 1, módulo resiliente (MPA), deformación total del espécimen 2 del grupo convencional y los datos de la variable módulo resiliente (MPA), deformación total del Espécimen 1, módulo resiliente (MPA), deformación total del espécimen 2 del grupo experimental NO proviene de una distribución normal.

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

P – Valor calculado con software SPSS versión 21

Tabla 45:

Prueba de normalidad del módulo resiliente y la deformación total recuperable de la mezcla SMA experimental y convencional

	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Módulo Resiliente (MPA) - mezcla Convencional - Espécimen 1	0,932	5	0,613
Deformación Total - mezcla Convencional - Espécimen 1	0,815	5	0,106
Módulo Resiliente (MPA) - mezcla Convencional - Espécimen 2	0,886	5	0,338
Deformación Total - mezcla Convencional - Espécimen 2	0,814	5	0,104
Módulo Resiliente (MPA) - mezcla Experimental - Espécimen 1	0,987	5	0,966
Deformación Total - mezcla Experimental - Espécimen 1	0,815	5	0,107
Módulo Resiliente (MPA) - mezcla Experimental - Espécimen 2	0,987	5	0,966
Deformación Total - mezcla Experimental - Espécimen 2	0,867	5	0,254

Fuente: Elaboración propia

Los valores de p calculado con software SPSS de las variables módulo de resiliente de la mezcla asfáltica SMA: módulo resiliente (MPA), deformación total de los especímenes 1 y 2 del grupo convencional y del grupo experimental son:

0,63; 0,106; 0,338; 0,104; 0,966; 0,107; 0,966; 0,254.

Decisión: si $p > \alpha$ ($p > 0,05$), No se rechaza la hipótesis nula (H_0) en otras palabras aceptamos la hipótesis nula, caso contrario si $p < \alpha$ ($p < 0,05$) rechazamos la hipótesis nula, aceptando la hipótesis alterna.

Conclusión: Comparando cada uno de los valores de p que se muestra en la tabla con el valor de significancia $\alpha = 0,05$ se tiene que no se rechaza la hipótesis nula, porque los datos de la variable módulo resiliente (MPA), deformación total del Especimen 1, módulo resiliente (MPA), deformación total del espécimen 2 del grupo convencional y Los datos de la variable módulo resiliente (MPA), deformación total del Especimen 1, módulo resiliente (MPA), deformación total del espécimen 2 del grupo experimental todos los datos de las variables mencionados provienen de una distribución normal.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

- 1) Si bien el escurrimiento de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar es ligeramente menor respecto a la mezcla convencional y cumple con los requisitos de la mezcla (ver tabla 25 y 27), quiere decir que la fibra de bagazo de caña de azúcar puede reemplazar al 100% a la fibra celulosa y mejorar el escurrimiento de la mezcla. Pero en el ensayo AASHTO T – 283 de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar, el valor de la resistencia a la tracción retenida (TSR) es menor en un 30.38% que la mezcla asfáltica SMA convencional (ver tabla 29 y 31). Por ello no cumple con los requisitos de adherencia del AASHTO T -283, porque la ceniza del bagazo de caña en su composición química tiene más componente de dióxido de silicio SiO₂ y carece de óxido de calcio CaO, combinando esos dos componentes se forma una mezcla cementante, entonces la ceniza de bagazo de caña de azúcar no reemplaza al 100% a la cal hidratada, por eso no se puede reducir la susceptibilidad al daño por humedad (ver tabla 37). En cambio la mezcla convencional si cumple con los parámetros mínimos del AASHTO T – 283.
- 2) De acuerdo al diseño óptimo de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar (Ver tabla 25 y 27), el flujo cumple con los requisitos de la mezcla, pero es mayor que la mezcla asfáltica convencional, por ende tiene mayor deformación en la mezcla asfáltica. Si bien el flujo está dentro de los parámetros normales, utilizando los requisitos mínimos para la deformación permanente según AASHTO T-324, la mezcla no cumple como diseño SMA de alto volumen de tráfico, porque no supera las 20000 pasadas y su deformación no es menor de 12.5mm (ver figura 22), a ello se suma la mala adherencia de la mezcla. Por eso no se puede reducir la susceptibilidad

a la deformación permanente (ver tabla 38). En cambio la mezcla convencional si cumple con los parámetros mínimos del AASHTO T – 324.

- 3) En el diseño óptimo de la mezcla asfáltica SMA con fibra y ceniza del bagazo de caña de azúcar (ver tabla 25 y 27), la estabilidad que resiste la mezcla es menor en 17.25% que la mezcla asfáltica SMA convencional, dando por inicio que la mezcla asfáltica modificada no resistirá mayores cargas que requiere un tráfico pesado, ocasionando mayores deformaciones. El ensayo AASHTO TP – 31 de elasticidad, el módulo resiliente de la mezcla asfáltica SMA modificada es menor en un 42.15% respecto a la mezcla asfáltica SMA convencional (ver tabla 34 y 35), pero las dos mezclas cumplen con los requisitos mínimos del AASHTO 93 y el manual de Suelos y pavimentos del MTC a una temperatura de 20°C, quiere decir que por una mala adherencia de la mezcla modificada tiene una deformación total recuperable del 70% más que la convencional, con una carga de fuerza menor. Por ello la mezcla asfáltica SMA modificada no mejora su elasticidad (ver tabla 39).

Recomendaciones:

- 1) Se sugiere realizar una investigación con 50% de ceniza de bagazo de caña de azúcar más un 50% de cal hidrata como filler de la mezcla asfáltica SMA, con la finalidad de sustituir la cal hidratada por ser un filler contaminante, ya que la ceniza del bagazo de caña de azúcar tiene muchos componentes de sílice.
- 2) Se recomienda realizar nuevas investigaciones de diseño de mezcla asfáltica SMA para alto volumen de tráfico, tratando de reemplazar al 100% la fibra celulosa y la cal hidratada, que tienen un proceso químico contaminante, como puede ser: cabuya, coco, yute, paja, cascara de arroz, etc.
- 3) Teniendo en cuenta las conclusiones de la investigación, se recomienda realizar un diseño de mezcla de SUPERPAVE (Superior Performance Pavements) obteniendo nuevos parámetros de diseño como: el Reómetro de corte dinámico (DSR), viscosímetro rotacional (RV) y el reómetro de flexión (BBR) y tracción directa (DDT). Teniendo nuevos análisis de desempeño como: formación de ahuellamiento por deformación plástica, fisuración por fatiga y fisuración de origen térmico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- 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.
- Amaya, E. et al (2019), *Análisis del desempeño mecánico de las mezclas asfálticas tipo STONE MASTIC (SMA) para aplicación como capa de rodadura en pavimentos de alto volumen de tránsito en Colombia*. . (Tesis de posgrado) Universidad Católica de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Arenas, H. (1999). Tecnología del Cemento Asfáltico. Cali: Fundamentación para Actividades de Investigación y Desarrollo.
- ASEFMA. (2012). Diseño de mezclas SMA como capa de rodadura e intermedia, para su empleo en España. Madrid: VII Jornada Nacional de ASEFMA .
- ASEFMA. (2013). Fibras de celulosa aditivadas para mezclas tipo SMA con propiedades mejoradas. Madrid: VIII Jornada Nacional ASEFMA
- Asphalt Institute. (2001). Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente. Lexington: Asphalt Institute.
- ASTM International. (2012). Standar Test Method for Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures. Washington D.C.: ASTM Int'l.
- Bejarano, J y Caicedo, C (2017), *Análisis del comportamiento físico- mecánico de la mezcla asfáltica tipo MDC.19 con fibra natural de caña de azúcar*. (Tesis de pregrado) Universidad Católica de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Berenguer, R. E. (2017). La influencia de las cenizas de bagazo de caña de azúcar como reemplazo parcial del cemento en la resistencia a la compresión de los morteros. ALCONPAT, 33.
- Bustamante, E. (2017). *Análisis comparativo entre mezclas asfálticas convencionales y mezclas bituminosas Stone Mastic Asphalt (SMA), elaboradas con materiales de la provincia de Loja*. (Tesis de posgrado). Universidad Particular de Loja - Ecuador.

- Corbacho, J. (2019). *Análisis de la estabilidad marshall y la deformación permanente mediante el ensayo de rueda cargada de hamburgo de una mezcla asfáltica modificada en caliente con fibras de tereftalato de polietileno reciclado en la ciudad del Cusco-2018*. (Tesis de pregrado) Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Perú.
- 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.
- Fontalba, E (2015). *Diseño de un pavimento alternativo para la avenida circunvalación sector Guacamayo 1°etapa*. (Tesis de pregrado) Universidad Austral de Chile. Valdivia. Chile.
- Jimenez, C (2016). *Análisis comparativo de la estabilidad y la deformación del pavimento asfáltico con fibras celulósicas y pavimento asfáltico tradicional*. (Tesis de pregrado). Universidad Técnica de Ambato. Ecuador.
- Kraemer, C., Pardillo, J. M., Rocci, S., Romana, M., Sánchez Blanco, V., & del Val, M. Á. (2004). "Ingeniería de Carreteras" Volumen II. Madrid: Mc Graw Hill.
- Lopez, P (2018). *Desarrollar una propuesta de diseño para incrementar la durabilidad de los hormigones asfálticos en la región utilizando el método SMA (Stone Mastic Asphalt), elaborándolos en base a materiales locales*. (Tesis de posgrado) Universidad de Cuenca. Ecuador.
- Menéndez Acurio, J. R. (2016). "Ingeniería de Pavimentos" Tomo 1: Materiales. 5ta Edición. Lima: Instituto de la Cosntrucción y Gerencia - ICG}.
- Minaya Gonzáles, S., & Ordoñez Huaman, A. (2001). "Manual de Laboratorio Ensayos para Pavimentos" Volumen I. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Minaya Gonzáles, S., & Ordóñez Huaman, A. (2003). Superpave y el Diseño de Mezclas Asfálticas. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Minaya Gonzales, S., & Ordóñez Huamán, A. (2006). Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos, Segunda Edición. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería
- Montejo Fonseca, A. (2002). Ingeniería de Pavimentos: Fundamentos, estudios básicos y diseño. Segunda Edición. Bogotá: Universidad Caótica de Colombia.

- Montejo, A. (2006). *Ingeniería de Pavimentos*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
- MTC. (2013). *Especificaciones Técnicas Generales para Construcción*. Lima.
- MTC. (2014). *Manual de Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos*. Lima: Biblioteca Nacional del Perú.
- 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.
- Preciado, C., & Sierra, C. (2013). *Utilización de Fibras Desechadas de Procesos Industriales como Estabilizador de Mezclas Asfálticas SMA*. Bogotá.
- Reyes, F. (2003). *Diseño Racional de Pavimentos*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Ribeiro, T. (2011). *Estudio de la actividad Puzolánica y de la aplicación en concreto de cenizas del bagazo de caña de azúcar con diferentes características físico – químico*. Buenos Aires.
- Sanchez, M. (2014). *Influencia de la temperatura de compactación en el módulo dinámico de la mezcla asfáltica en la carretera Pericos - San Ignacio - Cajamarca*. Cajamarca.

ANEXOS

ÍNDICE DE ANEXOS:

ANEXO 1: DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD.....	I
ANEXO 2: MATRIZ DE CONSISTENCIA.....	II
ANEXO 3: INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS DE LA CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO GRUESO.....	III
ANEXO 4: INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS DE LA CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO FINO.....	XI
ANEXO 5: DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA SMA CON FIBRA Y CENIZA DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR.....	XX
ANEXO 6: DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA SMA CON FIBRA CELULOSA Y CAL HIDRATADA (CONVENCIONAL).....	XXIX
ANEXO 7: RESULTADOS DEL DISEÑO DE MEZCLA SMA CON FIBRA Y CENIZA DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZUCAR.....	XXXVIII
ANEXO 8: RESULTADO DEL DISEÑO DE MEZCLA SMA CON FIBRA CELULOSA Y CAL HIDRATADA (CONVENCIONAL).....	XLV
ANEXO 9: PROTOCOLO DE CALIBRACIÓN DE LOS EQUIPOS.....	LII