

ESTABILIZACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS STONE MASTIC ASPHALT (SMA) MEDIANTE INHIBIDORES DE DRENAJE COMO FIBRAS DE BASALTO

**HIRBIN FÉLIX CÉSPEDES REYNAGA
EDWIN DE LA CRUZ ALANYA
VITALY URIEL CESPEDES REYNAGA
DELMER HUAYRA ROMANI**

ESTABILIZACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS STONE MASTIC ASPHALT (SMA) MEDIANTE INHIBIDORES DE DRENAJE COMO FIBRAS DE BASALTO

**HIRBIN FÉLIX CÉSPEDES REYNAGA
EDWIN DE LA CRUZ ALANYA
VITALY URIEL CÉSPEDES REYNAGA
DELMER HUAYRA ROMANI**

Editor Chefe

Ivanio Folmer

Bibliotecária

Eliane de Freitas Leite

Revisora Técnica

Gabriella Eldereti Machado

Diagramação e Projeto Gráfico

Gabriel Eldereti Machado

Imagem capa

www.canva.com

Revisão

Organizadores e Autores(as)

Conselho Editorial

Prof. Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva - UNIDAVI

Prof. Dr. Astor João Schönnell Júnior - IFFAR

Prof. Dr. Alan Ricardo Costa - UFRR

Profa. Dra. Andréia Bulaty - UNESPAR

Profa. Dra. Carla da Conceição de Lima - UFVJM

Prof. Dr. Camilo Darsie de Souza - UNISC

Profa. Dra. Clarice Caldeira Leite - UFRGS

Profa. Dra. Cecilia Decarli - UFRGS

Prof. Dr. Carlos Adriano Martins - UNICID

Prof. Dr. Christian Dennys Monteiro de Oliveira - UFCE

Profa. Dra. Dayse Marinho Martins - UFMA

Prof. Dr. Deivid Alex dos Santos - UEL

Prof. Dr. Dioni Paulo Pastorio - UFRGS

Prof. Dr. Douglas Manoel Antonio de Abreu Pestana dos Santos - FASESP

Profa. Dra. Elane da Silva Barbosa - UERN

Profa. Dra. Elen Gomes Pereira - IFBA

Profa. Dra. Francielle Benini Agne Tybusch - UFN

Prof. Dr. Francisco Odécio Sales - IFCE

Prof. Dr. Francisco Ricardo Miranda Pinto - UFCAT

Prof. Dr. Gilvan Charles Cerqueira de Araújo - UCB

Prof. Dr. Ismar Inácio dos Santos Filho - UFAL

Prof. Dr. Leonardo Bigolin Jantsch - UFSM

Profa. Dra. Liziany Müller Medeiros - UFSM

Profa. Dra. Marcela Mary José - UFRB

Prof. Dr. Mateus Henrique Köhler - UFSM

Prof. Dr. Michel Canuto de Sena - UFMS

Profa. Dra. Mônica Aparecida Bortolotti - UNICENTRO

Prof. Nilton David Vilchez Galarza - UPLA

Prof. Dr. Olavo Barreto de Souza - UEPB

Prof. Dr. Rafael Nogueira Furtado - UFABC

Prof. Dr. Roberto Araújo da Silva Vasques Rabelo - UNILUS

Prof. Dr. Rodrigo Toledo - USCS

Prof. Dr. Sidnei Renato Silveira - UFSM

Prof. Dr. Thiago Ribeiro Rafagnin - UFOB

Prof. Dr. Tomás Raúl Gómez Hernández - UCLV

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Estabilización de mezclas asfálticas stone mastic asphalt (SMA) mediante inhibidores de drenaje como fibras de basalto [livro eletrônico] / Hirbin Félix Céspedes Reynaga...[et al.]. -- Santa Maria, RS : Arco Editores, 2024.
PDF

Outros autores: Edwin de La Cruz Alanya, Vitaly Uriel Céspedes Reynaga, Delmer Huayra Romani.
Bibliografia.
ISBN 978-65-5417-244-8

1. Engenharia civil 2. Estradas 3. Pavimentos asfálticos I. Céspedes Reynaga, Hirbin Félix. II. de La Cruz Alanya, Edwin. III. Céspedes Reynaga, Vitaly Uriel. IV. Huayra Romani, Delmer.

24-196180

CDD-624

Índices para catálogo sistemático:

1. Engenharia civil 624

Eliane de Freitas Leite - Bibliotecária - CRB 8/8415



10.48209/978-65-5417-244-8

Este livro é o resultado de uma pesquisa científica em atividades de ciência e tecnologia que expande e aprofunda, por uma equipe de pesquisadores, os temas abordados na tese *Estabilización de mezclas asfálticas Stone Mastic Asphalt utilizando fibras de basalto como sustituto de las fibras de celulosa* apresentada à Universidad Ricardo Palma.

O trabalho foi revisado por pares acadêmicos externo antes de ser publicado.



CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	7
ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
RESUMEN.....	11
ABSTRACT.....	12
INTRODUCCIÓN.....	13
CAPÍTULO I.....	15
NOCIONES GENERALES SOBRE LA ESTABILIDAD DE LA MEZCLA ASFÁLTICA STONE MASTIC ASPHALT.....	15
1.1. Definición de <i>stone mastic asphalt</i> (SMA).....	16
1.2. Composición de la mezcla SMA.....	18
1.3. Estabilidad de la mezcla SMA y la intervención de factores.....	20
1.3.1. <i>Temperatura de mezclado y compactación</i>	20
1.3.2. <i>Grado de compactación</i>	22
1.3.3. <i>Condiciones ambientales</i>	24
1.4. Consideraciones en la construcción y mantenimiento.....	26
CAPÍTULO II.....	28
ASPECTOS MEDULARES EN RELACIÓN CON LOS INHIBIDORES DE DRENAJE DEL LIGANTE ASFÁLTICO EN SMA.....	28
2.1. Conceptualización sobre los inhibidores de drenaje.....	29
2.2. Inhibidores de drenaje: funciones y propiedades.....	31
2.3. Tipos de inhibidores de drenaje utilizado en SMA.....	33
2.4. Impacto de las fibras en la estabilidad de la mezcla SMA.....	36
2.5. Influencia de factores externos en la efectividad de las fibras.....	38
CAPÍTULO III.....	41
FUNDAMENTOS CENTRALES EN TORNO A LAS FIBRAS DE BASALTO.....	41

3.1. Definición y origen de las fibras de basalto.....	42
3.2. Contexto histórico y evolución de su uso.....	43
3.3. Propiedades física y químicas de las fibras de basalto.....	45
3.4. Comparación con otros tipos de fibra.....	48
3.5. Métodos de producción de fibras de basalto.....	50
CAPÍTULO IV.....	53
ESTABILIZACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS <i>STONE MASTIC ASPHALT</i> UTILIZANDO FIBRAS DE BASALTO COMO SUSTITUTO DE LAS FIBRAS DE CELULOSA.....	53
CAPÍTULO V.....	98
IMPORTANCIA DE LA ESTABILIZACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS <i>STONE MASTIC ASPHALT</i> MEDIANTE INHIBIDORES DE DRENAJE COMO FIBRAS DE BASALTO.....	98
5.1. Comportamiento de las fibras de basalto en mezclas asfálticas...	100
5.2. Avances tecnológicos en la estabilización de mezclas asfálticas SMA	102
5.3. Mejoras potenciales en la estabilidad de la mezcla SMA mediante fibras de basalto.....	105
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108
SOBRE LOS AUTORES.....	119

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Diseño muestral.....	55
Tabla 2 Operacionalización de variables.....	56
Tabla 3 Asfalto modificado - BETUTEC ID.....	62
Tabla 4 Fibra de basalto Sudaglass.....	63
Tabla 5 Fibra de celulosa VIATOP Premium.....	65
Tabla 6 Proporción en peso de los agregados en la mezcla asfáltica SMA...	66
Tabla 7 Combinación de agregados - Gradación AASHTO SMA TMN 12.5 mm.....	67
Tabla 8 Resultados de Va a 0.3 % de fibra estabilizadora.....	75
Tabla 9 Resultados de Va a 0.4 % de fibra estabilizadora.....	76
Tabla 10 Resultados de Va a 0.5 % de fibra estabilizadora.....	77
Tabla 11 Resultados de VMA a 0.3 % de fibra estabilizadora.....	78
Tabla 12 Resultados de VMA a 0.4 % de fibra estabilizadora.....	79
Tabla 13 Resultados de VMA a 0.5% de fibra estabilizadora.....	80
Tabla 14 Resultados de vacíos en el agregado grueso a 0.3 % de fibra estabilizadora.....	81
Tabla 15 Resultados de vacíos en el agregado grueso a 0.4% de fibra estabilizadora.....	82
Tabla 16 Resultados de vacíos en el agregado grueso a 0.5 % de fibra estabilizadora.....	83
Tabla 17 Resultados de TSR a 0.3 % de fibra estabilizadora.....	84
Tabla 18 Resultados de TSR a 0.4 % de fibra estabilizadora.....	85
Tabla 19 Resultados de TSR a 0.5 % de fibra estabilizadora.....	86
Tabla 20 Resultados de escurrimiento del ligante asfáltico a 0.3% de fibra estabilizadora.....	87
Tabla 21 Resultados de escurrimiento del ligante asfáltico a 0.4 % de fibra estabilizadora.....	87

Tabla 22 Resultados de escurrimiento del ligante asfáltico a 0.5 % de fibra estabilizadora.....	89
Tabla 23 Análisis de resultados de Va.....	90
Tabla 24 Análisis de resultados de VMA.....	91
Tabla 25 Análisis de resultados de VCAmix y VCAdrc.....	92
Tabla 26 Análisis de resultados de TSR.....	93
Tabla 27 Análisis de resultados de escurrimiento del asfalto.....	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Agregado grueso - Cantera Tuesta, Prov. Pedro Ruiz, Región Amazonas.....	58
Figura 2 Agregado fino - Cantera Tuesta, Prov. Pedro Ruiz, Región Amazonas.....	59
Figura 3 Filler - polvo de la trituración de agregados, Cantera Tuesta - R. Amazonas.....	60
Figura 4 Cal hidratada comercial local, Prov. Pedro Ruiz, Región Amazonas.....	61
Figura 5 Asfalto modificado - BETUTEC ID.....	63
Figura 6 Fibras de basalto - Sudaglass.....	64
Figura 7 Fibras de celulosa.....	65
Figura 8 Combinación de agregados - Gradación AASHTO SMA TMN 12.5 mm.....	68
Figura 9 Carta viscosidad/ temperatura BETUTEC ID.....	69
Figura 10 Determinación de las temperaturas de mezcla y compactación..	69
Figura 11 Preparación de las muestras de la mezcla asfáltica SMA.....	71
Figura 12 Muestras de la mezcla asfáltica SMA para el ensayo TSR.....	71
Figura 13 Determinación de los parámetros volumétricos de diseño.....	72
Figura 14 Determinación de la resistencia retenida a la tracción.....	73
Figura 15 Determinación de la susceptibilidad al deslizamiento del ligante asfáltico.....	74
Figura 16 Resultados de Va a 0.3 % de fibra estabilizadora.....	75
Figura 17 Resultados de Va a 0.4 % de fibra estabilizadora.....	76
Figura 18 Resultados de Va a 0.5 % de fibra estabilizadora.....	77
Figura 19 Resultados de VMA a 0.3 % de fibra estabilizadora.....	78
Figura 20 Resultados de VMA a 0.4 % de fibra estabilizadora.....	79

Figura 21 Resultados de VMA a 0.5% de fibra estabilizadora.....	80
Figura 22 Resultados de vacíos en el agregado grueso a 0.3% de fibra estabilizadora.....	81
Figura 23 Resultados de vacíos en el agregado grueso a 0.4% de fibra estabilizadora.....	82
Figura 24 Resultados de vacíos en el agregado grueso a 0.5 % de fibra estabilizadora.....	83
Figura 25 Resultados de TSR a 0.3 % de fibra estabilizadora.....	84
Figura 26 Resultados de TSR a 0.4 % de fibra estabilizadora.....	85
Figura 27 Resultados de TSR a 0.5 % de fibra estabilizadora.....	86
Figura 28 Resultados de escurrimiento del ligante asfáltico a 0.3 % de fibra estabilizadora.....	87
Figura 29 <i>Resultados de escurrimiento del ligante asfáltico a 0.4% de fibra estabilizadora.....</i>	<i>88</i>
Figura 30 <i>Resultados de escurrimiento del ligante asfáltico a 0.5% de fibra estabilizadora.....</i>	<i>89</i>

RESUMEN

La estabilización de mezclas asfálticas SMA con fibras de basalto, en lugar de celulosa, mejora parámetros clave, como los volumétricos y la resistencia a la fatiga (TSR), además de reducir el escurrimiento del asfalto. Esto sugiere que las fibras de basalto son una alternativa beneficiosa para mejorar el rendimiento de las mezclas SMA en comparación con las fibras de celulosa usuales. Al reemplazar fibras de celulosa con fibras de basalto en mezclas asfálticas SMA, se observa un ligero aumento en parámetros volumétricos y contenido de ligante. La TSR mejora, indicando mayor resistencia a deformaciones, y se reduce el escurrimiento del asfalto. Los resultados sugieren que las fibras de basalto son una opción viable, alcanzando rendimiento óptimo con 0.4 % de fibras y 6.52 % de contenido de asfalto, superando a las fibras de celulosa en estos aspectos. Su propósito fue 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.

Palabras claves: Mezclas asfálticas, SMA, fibras de basalto, inhibidores de drenaje, construcción

ABSTRACT

Stabilization of SMA asphalt mixtures with basalt fibers, instead of cellulose, improves key parameters, such as volumetrics and fatigue strength (TSR), in addition to reducing asphalt runoff. This suggests that basalt fibers are a beneficial alternative for improving the performance of SMA mixes compared to the usual cellulose fibers. By replacing cellulose fibers with basalt fibers in SMA asphalt mixtures, a slight increase in volumetric parameters and binder content is observed. TSR improves, indicating higher resistance to deformation, and asphalt runoff is reduced. The results suggest that basalt fibers are a viable option, achieving optimum performance with 0.4% fibers and 6.52% asphalt content, outperforming cellulose fibers in these aspects. Its purpose was to incorporate basalt fibers, as a substitute for cellulose fibers, into SMA asphalt mixtures in order to stabilize them according to the AASHTO design specification.

Keywords: Asphalt mixtures, SMA, basalt fibers, drainage inhibitors, construction.

INTRODUCCIÓN

La estabilización de mezclas asfálticas *stone mastic asphalt* (SMA) mediante fibras de basalto, en lugar de celulosa, emerge como una opción prometedora. La introducción de estas fibras ha demostrado mejoras notables, incluyendo un ligero aumento en parámetros volumétricos, mayor resistencia a la fatiga (TSR) y una reducción significativa en el escurrimiento del asfalto. Los resultados indican que las fibras de basalto pueden desempeñar un papel beneficioso, ofreciendo un rendimiento superior en comparación con las fibras de celulosa convencionales en la estabilización de mezclas SMA.

En el primer capítulo de esta investigación, se explican las nociones generales sobre la estabilidad de la mezcla asfáltica *stone mastic asphalt* (SMA). En esta sección, se detalla su definición, composición e intervención de factores como la temperatura, grado de compactación y condiciones ambientales. Este capítulo finaliza con las consideraciones en torno a la construcción y el mantenimiento. En el segundo capítulo se exponen los aspectos medulares en relación con los inhibidores de drenaje del ligante asfáltico en SMA. Este capítulo presenta la caracterización y particularidades enfocadas en los inhibidores de drenaje. Además, se pone énfasis en el impacto de las fibras y la influencia de factores externos. En el tercer capítulo se detallan los fundamentos centrales de las fibras de basalto; se abarca su definición, su contexto histórico y su evolución dentro de su funcionalidad. Asimismo, se expone acerca de sus propiedades fisicoquímicas, además de compararse con otros tipos de fibra.

El cuarto capítulo se centra en el aspecto analítico, enfocado en la estabilización de mezclas asfálticas SMA utilizando fibras de basalto como sustituto de las fibras de celulosa. Para finalizar, el quinto capítulo aborda la importancia de la estabilización de mezclas asfálticas SMA mediante inhibidores de dre-

naje como fibras de basalto. En este contexto, se determina que el propósito fue 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.

CAPÍTULO I

NOCIONES GENERALES SOBRE LA ESTABILIDAD DE LA MEZCLA ASFÁLTICA STONE MASTIC ASPHALT

Las nociones generales sobre la estabilidad de la mezcla asfáltica *stone mastic asphalt* (SMA) abarcan diversos aspectos esenciales que contribuyen a su rendimiento y durabilidad en aplicaciones viales (Hoyos *et al.*, 2021). El SMA, una variante especializada de las mezclas asfálticas, se distingue por la inclusión de fibras estabilizadoras, como celulosa o basalto, que refuerzan la matriz asfáltica y mejoran sus propiedades frente al agrietamiento y la deformación. La composición cuidadosamente seleccionada de agregados y ligante asfáltico busca optimizar la resistencia y durabilidad del pavimento (Castro *et al.*, 2020).

De acuerdo con Fretes (2020), la estabilidad de la mezcla SMA se ve influenciada por factores clave, entre ellos, la temperatura de mezclado y compactación, el grado de compactación y las condiciones ambientales. El control preciso de estas variables es esencial para lograr una cohesión óptima y una resistencia estructural adecuada. Asimismo, consideraciones específicas durante la construcción, como la adecuada aplicación de procedimientos de mezclado y compactación, y prácticas de mantenimiento regulares, son cruciales para preservar la calidad y prolongar la vida útil del pavimento SMA.

Las nociones generales sobre la estabilidad de la mezcla asfáltica *stone mastic asphalt* (SMA) revelan una interacción integral de factores que van desde su definición y composición hasta su estabilidad en condiciones específicas.

La incorporación de fibras estabilizadoras, las consideraciones durante el mezclado y compactación, el grado de compactación y las condiciones ambientales son elementos esenciales que determinan el rendimiento duradero de este tipo de pavimento. La construcción y el mantenimiento adecuados se erigen como pilares para garantizar la robustez y resistencia del pavimento SMA a lo largo del tiempo, reforzando su posición como una solución vanguardista para carreteras sometidas a altas cargas de tráfico y diversas condiciones climáticas. Estas nociones ofrecen una perspectiva holística sobre la estabilidad de la mezcla SMA, vital para el diseño y la gestión efectiva de infraestructuras viales de alta calidad.

1.1. Definición de *stone mastic asphalt* (SMA)

Como señalan Torres y Cedeño (2024), el *stone mastic asphalt* (SMA), o asfalto pétreo tipo mastic, es una mezcla asfáltica diseñada para brindar una resistencia y durabilidad excepcionales. Su composición incluye una cantidad significativa de agregados gruesos pétreos, que proporcionan resistencia estructural, y una proporción importante de finos minerales, que mejoran la capacidad de compactación y la adherencia del ligante asfáltico.

El uso de fibras estabilizadoras, ya sean de celulosa, basalto u otros materiales, representa una innovación clave en la formulación del SMA. Estas fibras desempeñan un papel fundamental al reforzar la matriz asfáltica, fortaleciendo la mezcla contra los desafíos específicos que enfrenta en entornos de tráfico intenso. La incorporación de estas fibras contribuye de manera significativa a mejorar la resistencia al agrietamiento por fatiga, una preocupación común en pavimentos sometidos a cargas repetitivas. Además, las fibras aportan una mayor resistencia a la tracción, un atributo crucial para enfrentar tensiones mecánicas, y promueven la cohesión general de la mezcla, asegurando una estructura duradera y resistente (Hoyos *et al.*, 2021).

Para Flores *et al.* (2022), esta característica distintiva del SMA, centrada en el uso estratégico de fibras estabilizadoras, no solo amplía la vida útil del pavimento, sino que también mejora su capacidad para resistir deformaciones plásticas, contribuyendo así a la sostenibilidad y eficacia de las superficies viales en condiciones exigentes. La ingeniosa combinación de materiales en el SMA, respaldada por las propiedades fortalecedoras de estas fibras, representa un avance significativo en la ingeniería de pavimentos y responde eficazmente a los desafíos inherentes a entornos viales de alta demanda.

Asimismo, Delbono y Gullino (2020) sostienen que el diseño estructural del SMA se centra estratégicamente en la creación de una superficie robusta y resistente al deslizamiento, características esenciales para su aplicabilidad en carreteras sometidas a altos volúmenes de tráfico y condiciones climáticas desafiantes. La textura rugosa de la mezcla mejora la tracción de los vehículos, a la vez que contribuye a la seguridad vial al reducir los riesgos de deslizamiento, especialmente en situaciones climáticas adversas. Esta atención al diseño superficial refleja la capacidad única del SMA para ofrecer un rendimiento fiable en entornos viales exigentes.

Además, Duarte *et al.* (2021) añaden que la estructura abierta del SMA juega un papel crucial en la gestión del agua superficial. La disposición de la mezcla permite un drenaje eficiente, canalizando el agua lejos de la superficie de la carretera y minimizando el riesgo de hidroplaneo. Este enfoque proactivo hacia la gestión del agua no solo mejora la durabilidad del pavimento al reducir la exposición a la humedad, sino que además promueve un entorno de conducción más seguro al prevenir acumulaciones de agua que podrían comprometer la estabilidad del vehículo.

En suma, el *stone mastic asphalt* se destaca como una innovadora solución en la ingeniería de pavimentos, caracterizada por la integración estratégica de fibras estabilizadoras y un diseño estructural que prioriza la resistencia al

deslizamiento y un eficiente drenaje del agua superficial. Su aplicación en carreteras con elevados volúmenes de tráfico y en contextos climáticos adversos evidencia su versatilidad y capacidad para mejorar la seguridad vial y la durabilidad del pavimento. El SMA representa un avance en la tecnología de mezclas asfálticas, y demuestra ser una respuesta efectiva a los desafíos específicos que enfrentan las superficies viales en entornos exigentes, consolidándose como una elección significativa para la construcción y mantenimiento de infraestructuras viales sostenibles y de alto rendimiento.

1.2. Composición de la mezcla SMA

La composición precisa del *stone mastic asphalt* (SMA) se distingue por la meticulosa elección de sus componentes, orientada a obtener un pavimento altamente eficiente. En la selección de agregados, se incorpora grava triturada y arena chancada, ambas sometidas a granulometrías específicas que se ajustan a los criterios del diseño SMA, persiguiendo una combinación que optimice tanto la resistencia como la durabilidad del pavimento. El ligante asfáltico, elemento clave en la conformación de la matriz asfáltica, se elige estratégicamente, teniendo en cuenta las condiciones climáticas locales y los patrones de tráfico, para asegurar una cohesión efectiva en la mezcla (Fretes, 2020).

Como señalan Hoyos *et al.* (2021), la atención minuciosa a la selección de materiales en la composición del SMA es esencial para garantizar un pavimento de alto rendimiento que se adapte a las exigencias de las condiciones ambientales y de tráfico. La combinación cuidadosa de agregados y el adecuado ligante asfáltico no solo mejoran la resistencia del pavimento, sino que también contribuyen a su durabilidad y capacidad para enfrentar desafíos específicos del entorno en el que será utilizado.

La característica distintiva del *stone mastic asphalt* (SMA) radica en la incorporación de fibras estabilizadoras, que pueden ser de celulosa, basalto u

otros materiales. Estas fibras desempeñan un papel crucial al mejorar significativamente la resistencia del pavimento. Su función principal es prevenir el agrietamiento por fatiga y la deformación plástica, aportando una mayor resistencia a la tracción y mejorando la cohesión general de la mezcla asfáltica. La adición estratégica de estas fibras no solo fortalece la estructura del pavimento, sino que también optimiza su comportamiento frente a cargas repetidas y condiciones adversas, consolidando al SMA como una solución avanzada y duradera para las exigencias del tráfico moderno y las variaciones climáticas (Jaramillo *et al.*, 2021).

Según Castro *et al.* (2020), la presencia de fibras estabilizadoras en el SMA representa un avance significativo en el diseño de pavimentos, ya que no solo fortalece la mezcla, sino que también confiere propiedades mejoradas de resistencia y durabilidad. Esta innovadora tecnología contribuye a elevar el estándar de rendimiento de las carreteras, brindando una solución eficaz y duradera para los desafíos dinámicos a los que se enfrentan las infraestructuras viales contemporáneas.

En resumen, la composición cuidadosamente seleccionada del *stone mastic asphalt* (SMA) refleja una combinación sinérgica de agregados específicos, ligante asfáltico adaptado al entorno local y la incorporación estratégica de fibras estabilizadoras. Este diseño minucioso busca no solo cumplir con los requisitos de resistencia y durabilidad, sino también superar los desafíos asociados con cargas repetidas y condiciones adversas. La presencia de fibras no solo fortalece la estructura del pavimento, sino que también eleva el SMA a una solución de pavimentación avanzada y eficiente, que responde de manera efectiva a las demandas del tráfico moderno y las variaciones climáticas. La mezcla SMA emerge como un componente esencial en el desarrollo de infraestructuras viales sostenibles y de alto rendimiento.

1.3. Estabilidad de la mezcla SMA y la intervención de factores

De acuerdo con Al-Kheetan *et al.* (2022), la estabilidad de la mezcla *stone mastic asphalt* constituye un aspecto crucial en el diseño y rendimiento de pavimentos asfálticos. Diversos factores intervienen en este proceso, siendo la temperatura de mezclado y compactación, el grado de compactación y las condiciones ambientales, elementos determinantes. La temperatura de mezclado y compactación desempeña un papel fundamental, influenciando la viscosidad del ligante asfáltico y la adherencia de los agregados, lo cual impacta directamente en la cohesión de la mezcla. Asimismo, el grado de compactación, esencial para garantizar la densidad adecuada, afecta la resistencia y durabilidad del pavimento. Además, las condiciones ambientales, como la temperatura ambiente y la humedad, pueden incidir en la manipulación y comportamiento de la mezcla durante el proceso de construcción. Un análisis detallado de estos factores es esencial para asegurar la estabilidad y el rendimiento óptimo de la mezcla SMA en diversas condiciones operativas.

1.3.1. Temperatura de mezclado y compactación

La temperatura de mezclado y compactación es un factor crítico en el proceso de producción y colocación del SMA. Durante el mezclado, la temperatura influye en la viscosidad del ligante asfáltico, afectando la capacidad de recubrimiento y la adhesión a los agregados. Es esencial mantener una temperatura adecuada para asegurar una distribución homogénea del ligante en toda la mezcla. Además, la temperatura de compactación juega un papel crucial en la densificación de la mezcla durante la fase de construcción (Fretes, 2020).

La temperatura desempeña un papel crucial en el proceso de mezclado y compactación de *stone mastic asphalt*. El rango típico de temperatura de mezclado se sitúa entre 150 °C y 170 °C, mientras que la temperatura de compactación varía generalmente entre 140 °C y 160 °C. Estos valores actúan como

guías generales y se adaptan de manera específica según las exigencias del diseño de la mezcla y las condiciones climáticas locales. Una temperatura de mezclado adecuada facilita la correcta dispersión y adhesión del ligante asfáltico, garantizando una mezcla homogénea y coherente. Por otro lado, la temperatura de compactación es crucial para lograr una densificación óptima de la mezcla en la fase final de la construcción del pavimento, asegurando la resistencia estructural y durabilidad del SMA en servicio (Babalghaith *et al.*, 2020).

Para Torres y Cedeño (2024), el control preciso de las temperaturas de mezclado y compactación en el SMA desempeña un papel esencial en la obtención de un pavimento de alto rendimiento. Asegurar una cohesión óptima de la mezcla requiere una regulación cuidadosa de la temperatura durante la fase de mezclado, permitiendo una distribución uniforme del ligante asfáltico entre los agregados. La elección y la cuidadosa regulación de estas temperaturas son determinantes para garantizar una compactación adecuada durante la construcción del pavimento SMA, lo que a su vez contribuye a obtener una resistencia estructural óptima.

Estas consideraciones son vitales para lograr un rendimiento duradero y resistente a las cargas repetidas, especialmente en condiciones variables de tráfico y ambientales. Un control preciso de las temperaturas no solo favorece la calidad intrínseca de la mezcla, sino que también impacta directamente en la longevidad y la integridad del pavimento, asegurando que el SMA mantenga su capacidad estructural bajo diversas condiciones operativas y climáticas (Chegenizadeh *et al.*, 2021a).

A su vez, el control preciso de las temperaturas de mezclado y compactación en el SMA representa un aspecto clave para alcanzar un pavimento de calidad y alto rendimiento. La regulación cuidadosa de estas temperaturas contribuye directamente a lograr una distribución homogénea del ligante asfáltico, asegurando una cohesión óptima entre los agregados y facilitando una com-

pactación adecuada durante la construcción. Este enfoque meticuloso es esencial para garantizar una resistencia estructural duradera y un comportamiento sobresaliente frente a las cargas repetidas, factor crucial en la longevidad y el rendimiento efectivo del pavimento SMA bajo diversas condiciones operativas y climáticas.

1.3.2. Grado de compactación

El grado de compactación en las mezclas asfálticas *stone mastic asphalt* es un factor fundamental que influye directamente en la calidad y durabilidad del pavimento. Este parámetro se refiere a la densidad alcanzada por la mezcla durante el proceso de compactación y se expresa como un porcentaje del volumen máximo teórico. Generalmente, el grado de compactación objetivo para las mezclas SMA se sitúa entre el 94 % y el 98 %, dependiendo de las especificaciones del diseño y las condiciones del proyecto (Morea *et al.*, 2023).

Noura *et al.* (2021) sostienen que la importancia de alcanzar un alto grado de compactación en las mezclas asfálticas SMA radica en su capacidad para proporcionar una estructura densa y resistente, capaz de soportar eficientemente las cargas del tráfico y enfrentar condiciones climáticas adversas. Durante el proceso de compactación, se persigue la eliminación efectiva de los vacíos entre los agregados, promoviendo una mayor cohesión en la mezcla y asegurando una adecuada adhesión del ligante asfáltico. Esta cuidadosa compactación contribuye significativamente a mejorar la resistencia global del pavimento, su durabilidad y su capacidad para resistir deformaciones, ofreciendo así un rendimiento sostenible y prolongado a lo largo de la vida útil de la carretera. La correcta ejecución de este proceso es esencial para garantizar no solo una superficie vial segura y estable, sino también para minimizar los riesgos de fisuración y otros deterioros prematuros.

La precisión en el control del grado de compactación juega un papel fundamental en el desempeño efectivo de las mezclas asfálticas SMA, y es esencial

para maximizar su resistencia frente a deformaciones plásticas y fisuraciones. Un grado de compactación adecuado garantiza la eliminación eficiente de los vacíos entre los agregados y contribuye a la formación de una matriz asfáltica coherente. Esto, además de optimizar la capacidad de carga de la superficie de la carretera, también minimiza los riesgos de fatiga y otros tipos de deterioro prematuro, proporcionando una vida útil prolongada al pavimento (Castro *et al.*, 2020).

Según Hoyos *et al.* (2021), la correlación directa entre el control preciso del grado de compactación y la durabilidad de la mezcla SMA subraya la importancia de implementar prácticas de construcción y técnicas de compactación que cumplan con las especificaciones de diseño. Un control meticuloso mejora la capacidad estructural del pavimento, a la vez que respalda la resistencia a las deformaciones y fisuraciones, asegurando un rendimiento óptimo a lo largo del tiempo y la funcionalidad eficiente de la carretera en diversas condiciones de tráfico y ambientales.

En conclusión, el grado de compactación en las mezclas asfálticas SMA se erige como un factor determinante para la calidad y durabilidad del pavimento. La atención meticulosa a este aspecto durante el proceso de construcción garantiza una estructura densa y resistente, capaz de soportar las cargas del tráfico y resistir las inclemencias del clima. La óptima eliminación de vacíos entre los agregados y la formación de una matriz asfáltica coherente, logradas mediante un control preciso del grado de compactación, contribuyen a la longevidad del pavimento, minimizando riesgos de fisuraciones y deformaciones. En este sentido, la aplicación de prácticas de compactación acordes con las especificaciones de diseño se revela como una medida crucial para garantizar un rendimiento sostenible y eficiente de las superficies viales pavimentadas con mezclas SMA.

1.3.3. Condiciones ambientales

Las condiciones ambientales desempeñan un papel crucial en el comportamiento y rendimiento de las mezclas asfálticas SMA. Factores climáticos como la temperatura ambiente, la humedad y la radiación solar ejercen una influencia significativa en las distintas etapas de construcción de la carretera que incluyen la aplicación de la SMA. Ajustar las prácticas de mezclado, transporte y compactación de la SMA, según las condiciones específicas del entorno, se convierte en una necesidad para asegurar un óptimo desempeño de la mezcla. La variabilidad climática puede afectar aspectos críticos como la viscosidad del ligante asfáltico, la trabajabilidad de la mezcla y el tiempo disponible para cada fase del proceso de pavimentación. Por ende, comprender y adaptarse a las condiciones climáticas locales es esencial para garantizar la durabilidad y resistencia de la superficie de la carretera construida con mezclas SMA (Babalghaith *et al.*, 2020).

Es imperativo ajustar las prácticas de mezclado, transporte y compactación de la SMA a las condiciones específicas del entorno en el que se lleva a cabo la obra vial. La variación climática puede incidir en aspectos cruciales, como la viscosidad del ligante asfáltico, la trabajabilidad de la mezcla y el tiempo disponible para cada etapa del proceso. Asimismo, las condiciones climáticas locales afectan la duración del periodo de curado y tienen un impacto directo en la formación de una superficie duradera y resistente, resaltando la importancia de adaptarse a estas variables para asegurar el rendimiento óptimo de las mezclas SMA (Jasni *et al.*, 2020).

Por otro lado, Jiang *et al.* (2020) detallan que la exposición prolongada de la mezcla *stone mastic asphalt* a condiciones ambientales extremas, como ciclos de congelación y descongelación, o de intensa radiación solar, puede tener implicaciones significativas en la durabilidad del pavimento. Estas condiciones extremas pueden provocar cambios en las propiedades físicas y mecáni-

cas de la mezcla, afectando su resistencia, flexibilidad y adherencia a lo largo del tiempo.

Para abordar estos desafíos, es esencial implementar estrategias específicas en el diseño y construcción de la carretera. La selección adecuada de materiales y aditivos, así como la aplicación de técnicas constructivas diseñadas para resistir las condiciones climáticas adversas, son fundamentales. Además, la monitorización continua del comportamiento de la mezcla en condiciones reales permite ajustes y mejoras en los procesos constructivos para optimizar la durabilidad del pavimento SMA en ambientes desafiantes. La investigación continua y la aplicación de tecnologías innovadoras desempeñan un papel crucial en la adaptación y mejora continua de las mezclas SMA para garantizar un rendimiento sostenible en diversas condiciones ambientales (Gu *et al.*, 2022).

La adaptación de las prácticas constructivas a condiciones ambientales específicas es esencial para asegurar un rendimiento óptimo a lo largo del tiempo en las mezclas asfálticas *stone mastic asphalt*. La selección cuidadosa de las características de diseño, como la elección de los agregados y el tipo de ligante asfáltico, juega un papel crucial en la capacidad de la mezcla para resistir las variaciones climáticas. Además, la implementación de técnicas de construcción específicas, como el control preciso de las temperaturas de mezclado y compactación, asegura una cohesión efectiva y una resistencia estructural óptima del pavimento SMA (Al-Kheetan *et al.*, 2022).

En este contexto, Zhou *et al.* (2023) señalan que la investigación continua y el desarrollo de nuevas tecnologías desempeñan un papel fundamental para mejorar la adaptabilidad de las mezclas SMA a diversas condiciones ambientales. La innovación en materiales y métodos constructivos permite optimizar la durabilidad y resistencia de las mezclas SMA, contribuyendo así a su rendimiento sostenible en entornos climáticos variables. La colaboración entre la industria, los investigadores y los profesionales del pavimento es esencial

para seguir avanzando en la eficiencia y la durabilidad de las mezclas SMA en un amplio espectro de condiciones ambientales.

Así, la influencia de las condiciones ambientales en el comportamiento de las mezclas asfálticas SMA destaca la importancia de una planificación y ejecución cuidadosas durante el proceso constructivo. La adaptación precisa de las prácticas constructivas a los elementos climáticos específicos, junto con la continua investigación y desarrollo en el campo, se erigen como elementos clave para garantizar la durabilidad y el rendimiento óptimo de las mezclas SMA. A medida que se avanza, la atención constante a la variabilidad climática y la implementación de técnicas innovadoras contribuirán a fortalecer la resistencia y la capacidad de las mezclas SMA para enfrentar desafíos ambientales diversos, consolidándolas como una solución vanguardista en el diseño de pavimentos.

1.4. Consideraciones en la construcción y mantenimiento

La construcción y el mantenimiento de mezclas asfálticas SMA requieren una cuidadosa atención a diversos aspectos para asegurar su rendimiento óptimo a lo largo del tiempo. En el proceso de construcción, se demanda una atención meticulosa a los procedimientos de mezclado y compactación. Es esencial ajustar las temperaturas de manera precisa de acuerdo con las especificaciones del diseño y las condiciones climáticas locales, asegurando así una cohesión óptima de la mezcla. Paralelamente, el control del grado de compactación es un factor crítico para alcanzar una estructura robusta y duradera, eliminando vacíos entre los agregados y garantizando una adecuada adherencia del ligante asfáltico. Estas prácticas durante la construcción son fundamentales para la obtención de un pavimento SMA de alta calidad y rendimiento a largo plazo (Gardziejczyk *et al.*, 2020).

En la fase de mantenimiento de las mezclas asfálticas *stone mastic asphalt*, la realización de inspecciones regulares es fundamental para evaluar el

estado del pavimento y detectar posibles áreas de deterioro. Estas evaluaciones permiten tomar medidas preventivas o correctivas de manera oportuna, asegurando una intervención eficiente para mantener la integridad de la mezcla. La reparación o reposición de secciones desgastadas o dañadas se convierte en una estrategia clave para extender la vida útil del pavimento SMA, garantizando un comportamiento sostenible y resistente ante las condiciones cambiantes del tráfico y el medioambiente. Este enfoque proactivo en el mantenimiento contribuye significativamente a preservar la calidad y funcionalidad del pavimento a lo largo del tiempo (Chegenizadeh *et al.*, 2021b).

En resumen, las consideraciones en la construcción y el mantenimiento de las mezclas asfálticas SMA son pilares fundamentales para garantizar la calidad y durabilidad de los pavimentos. La aplicación precisa de procedimientos de mezclado y compactación durante la construcción, adaptados a las condiciones climáticas locales, es esencial para obtener una estructura resistente y cohesiva. Además, el mantenimiento regular, mediante la inspección y reparación oportuna, se presenta como una estrategia efectiva para preservar la integridad del pavimento SMA y extender su vida útil. Estas prácticas, cuando se implementan de manera cuidadosa, contribuyen significativamente a mantener un rendimiento óptimo del pavimento SMA ante las demandas del tráfico y las variaciones ambientales.

CAPÍTULO II

ASPECTOS MEDULARES EN RELACIÓN CON LOS INHIBIDORES DE DRENAJE DEL LIGANTE ASFÁLTICO EN SMA

La aplicación de inhibidores de drenaje del ligante asfáltico en mezclas *stone mastic asphalt* (SMA) constituye un aspecto fundamental para la gestión eficaz de estos pavimentos. Estos inhibidores, al interferir con la capacidad de drenaje del sistema, pueden manifestarse como contaminantes que obstruyen o reducen la eficiencia de los sistemas de drenaje, incluyendo alcantarillas y desagües, afectando negativamente la evacuación de agua de lluvia. Este escenario puede desencadenar consecuencias perjudiciales como inundaciones, daños en la infraestructura y riesgos para la seguridad vial (Selsal *et al.*, 2022).

En este contexto, Noura *et al.* (2021) detallan que es vital comprender las funciones y propiedades de estos inhibidores, considerando su impacto en la reducción del escurrimiento superficial y la mejora de la cohesión del ligante. Además, la influencia de factores externos, como la carga vehicular y las condiciones ambientales, particularmente ciclos de congelación y descongelación, cobra relevancia para evaluar la efectividad de las fibras estabilizadoras en la mezcla SMA.

En definitiva, la gestión efectiva de los inhibidores de drenaje del ligante asfáltico en mezclas SMA se revela como un elemento crítico para asegurar el rendimiento óptimo de estos pavimentos. La comprensión de su conceptualización, funciones y propiedades, así como su impacto en la estabilidad de

las mezclas SMA y su relación con factores externos, destaca la necesidad de estrategias integrales en su aplicación y supervisión. Enfrentar los desafíos asociados con la gestión de inhibidores de drenaje requiere considerar no solo las propiedades intrínsecas de estos aditivos, sino también la interacción dinámica con factores ambientales y de carga vehicular. Este enfoque holístico resulta esencial para mantener la durabilidad y eficiencia de los pavimentos SMA en diversas condiciones operativas, contribuyendo así al desarrollo sostenible de las infraestructuras viales.

2.1. Conceptualización sobre los inhibidores de drenaje

Çevrim e Iskender (2022) mencionan que los inhibidores de drenaje son sustancias o materiales que afectan negativamente la capacidad de un sistema para evacuar o drenar líquidos de manera eficiente. Estos inhibidores pueden presentarse en diversos campos, pero su impacto es especialmente relevante en infraestructuras viales, como carreteras y autopistas. En este contexto, los inhibidores de drenaje pueden incluir sedimentos, residuos, aceites, productos químicos u otros elementos que comprometen la funcionalidad de los sistemas de drenaje, como alcantarillas y desagües.

Cuando estos inhibidores interfieren en el flujo normal del agua de lluvia, pueden provocar obstrucciones, acumulación de agua en la superficie de la carretera y, en última instancia, aumentar el riesgo de inundaciones y daños en la infraestructura vial. La comprensión detallada de los inhibidores de drenaje es esencial para desarrollar estrategias efectivas de prevención y gestión. Esto implica la implementación de prácticas de mantenimiento adecuadas, la adopción de tecnologías que minimicen la acumulación de estos inhibidores y la promoción de medidas que preserven la funcionalidad óptima de los sistemas de drenaje en entornos viales, garantizando así la seguridad y durabilidad de la infraestructura (Selsal *et al.*, 2022).

En el contexto de infraestructuras viales, como carreteras y autopistas, los inhibidores de drenaje pueden presentarse como contaminantes que obstruyen o reducen la capacidad de los sistemas de drenaje, como alcantarillas y desagües, para evacuar el agua de lluvia de manera rápida y eficaz. Estos inhibidores pueden incluir sedimentos, residuos, aceites, productos químicos u otros materiales que comprometen la funcionalidad del sistema de drenaje y, como consecuencia, pueden dar lugar a problemas como inundaciones, daños en la infraestructura y riesgos para la seguridad vial (Chen *et al.*, 2021a).

Según Eren *et al.* (2023), la presencia de inhibidores de drenaje en las carreteras puede derivar de diversas fuentes, como el escurrimiento de contaminantes de la superficie de la carretera, la acumulación de residuos sólidos, o el vertido indebido de sustancias químicas. La comprensión de los inhibidores de drenaje es crucial para diseñar estrategias efectivas de prevención y gestión que aseguren un rendimiento óptimo de las redes de drenaje en entornos viales. Estos inhibidores pueden tener diversas fuentes y composiciones, desde sedimentos y residuos sólidos hasta productos químicos y aceites, todos los cuales pueden afectar negativamente la capacidad de los sistemas de drenaje para evacuar agua de manera eficiente. La identificación temprana de estos inhibidores, ya sea a través de inspecciones regulares o tecnologías de monitoreo avanzadas, permite la implementación oportuna de medidas correctivas, como limpieza, filtración y gestión de residuos, para mantener la funcionalidad de las infraestructuras viales y prevenir problemas asociados, como inundaciones y deterioro de la carretera.

Por consiguiente, la gestión efectiva de los inhibidores de drenaje es esencial para garantizar la funcionalidad y seguridad de las infraestructuras viales. La identificación, prevención y mitigación de estos inhibidores son aspectos clave en el mantenimiento de sistemas de drenaje eficientes, y contribuyen a la preservación de la integridad de las carreteras y autopistas, así como a la

seguridad y comodidad de los usuarios. La continua atención a estos aspectos fortalece la resiliencia de las redes viales frente a los desafíos ambientales y las condiciones climáticas variables.

2.2. Inhibidores de drenaje: funciones y propiedades

De acuerdo con Jamieson y White (2021), los inhibidores de drenaje desempeñan un papel crucial en la gestión de sistemas de drenaje, dado que buscan prevenir o minimizar obstrucciones y reducciones en la eficiencia de evacuación de agua en infraestructuras viales. Sus propiedades varían, y pueden abarcar desde agentes que impiden la acumulación de sedimentos hasta compuestos que reducen la adhesión de residuos oleosos en las superficies de drenaje. Estos inhibidores buscan mantener la permeabilidad de los sistemas de drenaje al tiempo que evitan la acumulación de materiales que podrían afectar negativamente el flujo del agua. Asimismo, su función principal es contribuir a la preservación y operatividad de las redes de drenaje, previniendo problemas como inundaciones, deterioro de la infraestructura y riesgos para la seguridad vial.

Incluso, se determina que un objetivo clave en la gestión sostenible del agua y la infraestructura vial es la reducción del escurrimiento superficial. Los inhibidores de drenaje desempeñan un papel crucial en este contexto, al minimizar la acumulación de materiales en las superficies de drenaje, como sedimentos, hojas, aceites y otros contaminantes. Estos inhibidores ayudan a preservar la capacidad de los sistemas de drenaje para evacuar el agua de manera eficiente, reduciendo así la posibilidad de inundaciones y daños en la infraestructura (Jamieson y White, 2020).

Para Oner (2023), además de prevenir obstrucciones, algunos inhibidores de drenaje también actúan como agentes repelentes, reduciendo la adhesión de sustancias oleosas en las superficies de drenaje. Esta propiedad no solo contri-

buye a mantener la permeabilidad de los sistemas, sino que también ayuda a prevenir la contaminación del agua al disminuir la cantidad de contaminantes transportados por el escurrimiento superficial. En conjunto, la implementación efectiva de inhibidores de drenaje puede tener un impacto significativo en la reducción del escurrimiento superficial y la preservación de la calidad del agua en entornos viales.

Otra propiedad fundamental es la mejora de la cohesión del ligante. Estos inhibidores están formulados para interactuar con el ligante asfáltico, mejorando su capacidad de mantener la cohesión frente a factores adversos como la lluvia y la presencia de agua en la superficie de la carretera. Al actuar como agentes adhesivos, estos inhibidores contribuyen a prevenir la separación de los agregados y a mantener la integridad de la mezcla asfáltica, especialmente en condiciones climáticas desafiantes (Selsal *et al.*, 2022).

Según Wu *et al.* (2023), la mejora de la cohesión del ligante a través de inhibidores de drenaje no solo fortalece la durabilidad del pavimento, sino que también puede tener un impacto positivo en la resistencia a la deformación plástica y el agrietamiento por fatiga. Este beneficio adicional es crucial para la preservación a largo plazo de la infraestructura vial, ya que la cohesión mejorada del ligante contribuye a mitigar los efectos adversos del tráfico vehicular y las variaciones climáticas en la superficie de la carretera.

De igual modo, Jamieson y White (2020) mencionan que los inhibidores de drenaje desempeñan un papel esencial en la mejora de la resistencia al envejecimiento de las mezclas asfálticas, especialmente en climas extremos. El envejecimiento del pavimento, causado por la exposición constante a los rayos UV, cambios de temperatura y otros factores climáticos, puede llevar a la pérdida de flexibilidad y la aparición de fisuras en la superficie. Al integrar inhibidores de drenaje en la mezcla asfáltica, se puede reducir el impacto de estos factores, prolongando la vida útil del pavimento y manteniendo su integridad estructural.

En climas extremos, donde las temperaturas pueden oscilar entre extremos fríos y cálidos, la presencia de inhibidores de drenaje contribuye a mitigar el estrés térmico sobre la mezcla asfáltica. Estos inhibidores ayudan a prevenir la formación de grietas y fisuras, proporcionando una capa protectora adicional que mejora la resistencia de la mezcla a las condiciones climáticas extremas. De esta manera, los inhibidores de drenaje desempeñan un papel crucial en la preservación de la calidad del pavimento y en la reducción de los efectos adversos del envejecimiento y las variaciones climáticas (Noura *et al.*, 2021).

En suma, los inhibidores de drenaje son componentes fundamentales en las mezclas asfálticas, desempeñando un papel vital en la reducción del escurrimiento superficial, la mejora de la cohesión del ligante, la resistencia al envejecimiento y la adaptación a climas extremos. Estas propiedades se traducen en un pavimento más duradero, resistente y capaz de enfrentar desafíos climáticos, contribuyendo así a la eficiencia y seguridad de las infraestructuras viales. La comprensión y aplicación adecuada de los inhibidores de drenaje se revelan como elementos esenciales para optimizar el rendimiento y la durabilidad de las carreteras y autopistas en diversas condiciones ambientales.

2.3. Tipos de inhibidores de drenaje utilizado en SMA

La implementación de inhibidores de drenaje en las mezclas asfálticas, como el SMA, abarca diversos tipos de sustancias destinadas a mejorar la resistencia y durabilidad del pavimento al evitar problemas relacionados con el escurrimiento superficial y la acumulación de agua. Estos inhibidores, cuidadosamente seleccionados, desempeñan un papel crucial en la gestión efectiva del drenaje y contribuyen al rendimiento óptimo de las carreteras en condiciones climáticas diversas.

Elganidi *et al.* (2022) señalan que la incorporación de aditivos poliméricos en las mezclas asfálticas constituye una práctica común para mejorar las propiedades y funcionalidades específicas del pavimento. Estos aditivos, gene-

ralmente polímeros sintéticos, están diseñados para modificar las características del ligante asfáltico y, por ende, influir en la respuesta estructural y mecánica de la mezcla. Los polímeros ofrecen beneficios significativos, tales como la mejora de la cohesión del ligante, la resistencia al envejecimiento y la capacidad de recuperación elástica del pavimento, lo que contribuye a su durabilidad y desempeño a largo plazo.

La introducción de aditivos poliméricos también se enfoca en la reducción de escurrimiento superficial y la mejora de la adhesión entre los agregados y el ligante, mitigando así problemas asociados con el agrietamiento y la pérdida de material superficial. Estos polímeros actúan como estabilizadores, proporcionando una mayor resistencia a las deformaciones plásticas y mejorando la capacidad de la mezcla para resistir condiciones climáticas extremas. En resumen, los aditivos poliméricos desempeñan un papel esencial en la optimización de las propiedades de las mezclas SMA, fortaleciendo su capacidad para soportar cargas de tráfico y condiciones adversas en entornos viales (Singh *et al.*, 2023).

La inclusión de modificadores de ligantes asfálticos en las mezclas asfálticas representa una estrategia clave para mejorar las propiedades del ligante y, por ende, fortalecer la funcionalidad de las infraestructuras viales. Estos modificadores, que pueden ser polímeros, elastómeros o compuestos químicos específicos, están diseñados para alterar las características del ligante, mejorando aspectos como la resistencia al envejecimiento, la cohesión, la elasticidad y la adhesión entre los agregados y el ligante (Días *et al.*, 2021).

Por otro lado, Bhat y Mir (2022) sostienen que el uso de modificadores de ligantes asfálticos contribuye a optimizar la respuesta estructural de la mezcla, aumentando su capacidad para resistir las tensiones causadas por cargas de tráfico y las condiciones ambientales adversas. Además, estos modificadores pueden jugar un papel crucial en la reducción de la susceptibilidad térmica y en la mejora de la durabilidad del pavimento, disminuyendo la formación de grietas y aumentando la vida útil del mismo. En resumen, la aplicación de mo-

dificadores de ligantes asfálticos en las mezclas SMA desempeña un papel vital en la mejora de la funcionalidad y el rendimiento a largo plazo de las infraestructuras viales.

Las fibras de basalto y las fibras de celulosa son dos tipos de fibras estabilizadoras comúnmente utilizadas en las mezclas asfálticas, con impactos significativos en la funcionalidad de las infraestructuras viales. Las fibras de basalto, derivadas de minerales naturales, aportan propiedades mecánicas y térmicas excepcionales a la mezcla. Su incorporación mejora la resistencia al agrietamiento por fatiga, la cohesión del pavimento y la capacidad de soportar cargas de tráfico repetidas. Además, las fibras de basalto contribuyen a reducir el escurrimiento del ligante asfáltico, lo que resulta en una mayor estabilidad de la mezcla y una prolongada durabilidad del pavimento (Wu *et al.*, 2022).

Las fibras de celulosa, al ser de origen natural, también desempeñan un papel esencial en la funcionalidad de las infraestructuras viales. Su capacidad para mejorar la tenacidad y la resistencia a la tracción de la mezcla las hace valiosas como fibras estabilizadoras en el SMA. La fibra de celulosa contribuye a prevenir el agrietamiento y la deformación plástica, promoviendo una mayor cohesión en la mezcla. La elección entre fibras de basalto y fibras de celulosa dependerá de las necesidades específicas del proyecto, las condiciones climáticas locales y los requisitos de diseño para lograr un pavimento con un rendimiento óptimo y una vida útil prolongada (Li *et al.*, 2021).

Por tanto, la gestión efectiva de los inhibidores de drenaje en las mezclas asfálticas SMA es esencial para asegurar la funcionalidad óptima de las infraestructuras viales. Con la comprensión de los diversos inhibidores, como aditivos poliméricos, modificadores de ligantes asfálticos y fibras estabilizadoras como el basalto y la celulosa, se puede implementar estrategias de diseño y construcción que minimicen los efectos adversos en el sistema de drenaje y maximicen la durabilidad y resistencia del pavimento. La selección cuidadosa

de estos inhibidores, considerando las condiciones climáticas y las necesidades específicas del proyecto, juega un papel crucial en la creación de carreteras sostenibles y duraderas.

2.4. Impacto de las fibras en la estabilidad de la mezcla SMA

El impacto de las fibras en la estabilidad de la mezcla SMA es un aspecto fundamental en el diseño y rendimiento de las infraestructuras viales (Ho *et al.*, 2021). La incorporación de fibras, ya sean de basalto, celulosa u otros materiales, desempeña un papel crucial en el fortalecimiento de la matriz asfáltica, mejorando su resistencia a la fatiga, la tracción y proporcionando mayor cohesión a la mezcla. Este componente esencial no solo influye en la durabilidad y la capacidad estructural de la mezcla SMA, sino que además impacta directamente en la resistencia al agrietamiento y en la capacidad de enfrentar condiciones climáticas adversas, contribuyendo así a la creación de carreteras más duraderas y resilientes.

La mejora de la resistencia a la segregación es una consideración crucial en el diseño y la construcción de mezclas SMA. La incorporación de fibras, ya sean de basalto, celulosa u otros tipos, desempeña un papel significativo al mitigar el riesgo de segregación en la mezcla durante los procesos de mezclado, transporte y colocación. Estas fibras actúan como agentes estabilizadores que ayudan a mantener la uniformidad de la mezcla, evitando la separación de los componentes y asegurando una distribución homogénea de los agregados y el ligante asfáltico (Jung y Lee, 2020).

Además, Yang *et al.* (2023) señalan que la correcta selección y dosificación de los agregados también contribuyen a mejorar la resistencia a la segregación. El diseño cuidadoso de la gradación de los agregados, considerando la forma, tamaño y textura, puede ayudar a optimizar la cohesión de la mezcla, reduciendo así el potencial de segregación. En conjunto, estas estrategias no

solo mejoran la resistencia a la segregación, sino que también promueven la estabilidad general de la mezcla SMA, contribuyendo a la construcción de carreteras duraderas y de alta calidad.

A su vez, la influencia en la durabilidad de la mezcla SMA es sustancialmente afectada por factores como la incorporación de fibras, la selección adecuada de agregados y el contenido óptimo de ligante asfáltico. Las fibras, ya sean de basalto o celulosa, desempeñan un papel esencial al mejorar la cohesión de la mezcla, reduciendo el agrietamiento por fatiga y la deformación plástica, lo que contribuye a una mayor durabilidad del pavimento (Li *et al.*, 2021).

Para Jung y Lee (2020), la elección de agregados resistentes al desgaste y a la abrasión, así como la gradación adecuada, juega un papel crucial en la resistencia general de la mezcla a las condiciones ambientales y al tráfico constante. Además, el contenido óptimo de ligante asfáltico asegura una adecuada adherencia entre los agregados, mejorando la resistencia a la intemperie y prolongando la vida útil del pavimento SMA. En conjunto, estos factores de diseño y composición son fundamentales para garantizar la durabilidad y el rendimiento a largo plazo de las mezclas SMA en entornos viales diversos.

El impacto de las fibras en las consideraciones de diseño y dosificación de la mezcla SMA es significativo. La incorporación de fibras requiere una cuidadosa evaluación durante el proceso de diseño para lograr una mezcla equilibrada. La dosificación óptima de fibras influye en parámetros clave como la resistencia a la tracción, la resistencia a la deformación y la durabilidad de la mezcla. Se deben realizar ajustes precisos en la cantidad de fibras, así como en la combinación de otros materiales, para garantizar que la mezcla cumpla con los requisitos específicos de resistencia y rendimiento (Choi *et al.*, 2022). Incluso, las fibras impactan las consideraciones de dosificación del ligante asfáltico.

La presencia de fibras puede afectar la viscosidad y la cohesión de la mezcla, lo que requiere una adaptación en la cantidad de ligante asfáltico para mantener la adecuada trabajabilidad y cohesión de la SMA. Este proceso de

diseño y dosificación cuidadoso es esencial para lograr mezclas SMA con propiedades óptimas que satisfagan los requisitos de durabilidad y resistencia a lo largo de la vida útil del pavimento (Ho *et al.*, 2021).

En conclusión, el impacto de las fibras en la estabilidad de la mezcla SMA subraya la importancia de considerar cuidadosamente su incorporación durante el diseño y la dosificación. Tanto las fibras de basalto como las de celulosa desempeñan un papel crucial en la mejora de la resistencia y durabilidad de la mezcla, influenciando factores clave como la resistencia a la tracción y la deformación. El equilibrio preciso en la dosificación de fibras y ligante asfáltico es esencial para lograr un pavimento SMA que cumpla con los estándares de rendimiento y resistencia. La comprensión detallada de estos aspectos es vital para garantizar el éxito de la implementación de mezclas SMA en proyectos viales.

2.5. Influencia de factores externos en la efectividad de las fibras

La efectividad de las fibras en las mezclas SMA se ve significativamente influenciada por diversos factores externos. Entre estos factores, las condiciones climáticas desempeñan un papel crucial. La temperatura y la humedad ambiental pueden afectar la adherencia de las fibras al ligante asfáltico, así como la distribución homogénea de las fibras en la mezcla durante el proceso de mezclado. Las variaciones en las condiciones climáticas pueden influir en la trabajabilidad de la mezcla y, por ende, en su resistencia final (Chen *et al.*, 2022).

Autores como Chen *et al.* (2023a) indican que la influencia del tipo de carga vehicular y la intensidad del tráfico en la vía es un aspecto crítico para la efectividad de las fibras en las mezclas SMA. Las cargas pesadas y el tráfico constante generan esfuerzos significativos sobre la superficie del pavimento, y estos esfuerzos interactúan directamente con las fibras y el ligante asfáltico en la mezcla. La capacidad de resistir estos esfuerzos y mantener la integridad

estructural de la mezcla SMA depende de la correcta distribución y orientación de las fibras, así como de su capacidad para reforzar la matriz asfáltica.

En situaciones de tráfico intenso, donde las cargas vehiculares son frecuentes y pesadas, la resistencia a la fatiga de la mezcla SMA se vuelve fundamental. Las fibras, al actuar como refuerzo, contribuyen a mejorar la capacidad de resistir fisuras y deformaciones plásticas inducidas por el tráfico. Además, la interacción entre las fibras y el ligante asfáltico juega un papel crucial en la respuesta de la mezcla a las solicitaciones repetidas, asegurando un comportamiento sostenible bajo condiciones de tráfico exigentes. En este sentido, comprender y gestionar la influencia de la carga vehicular y la intensidad del tráfico es esencial para optimizar la durabilidad y el rendimiento de las mezclas SMA en entornos viales diversos (Choi *et al.*, 2022).

Según Chen *et al.* (2023b), la efectividad de las fibras en las mezclas SMA puede verse influida por condiciones ambientales extremas, especialmente en regiones propensas a ciclos de congelación y descongelación. Estos ciclos climáticos pueden generar tensiones adicionales en la mezcla y afectar la durabilidad de las fibras, comprometiendo su capacidad para mantener la estabilidad de la mezcla a lo largo del tiempo. La exposición a temperaturas extremas también puede influir en la respuesta del ligante asfáltico y la interacción entre las fibras, lo que destaca la importancia de comprender y gestionar estos factores externos.

Asimismo, gestionar adecuadamente la influencia de las condiciones ambientales es esencial para maximizar la efectividad a largo plazo de las fibras en las mezclas SMA. Estrategias de diseño y prácticas de construcción que consideren la variabilidad climática, así como medidas de mantenimiento preventivo, son fundamentales para asegurar un rendimiento duradero y consistente de las mezclas SMA en entornos con condiciones ambientales diversas (Chen *et al.*, 2022).

En síntesis, la efectividad de las fibras en las mezclas SMA está intrínsecamente ligada a diversos factores externos, como las condiciones ambientales, la carga vehicular y la intensidad del tráfico. La comprensión y gestión adecuada de estos elementos son esenciales para maximizar la estabilidad y durabilidad de las mezclas SMA a lo largo del tiempo. Asimismo, la implementación de prácticas de diseño adaptadas a condiciones específicas y medidas de mantenimiento preventivo contribuirán significativamente a asegurar un rendimiento óptimo de las mezclas SMA en distintos entornos y circunstancias, consolidando así su papel como una solución avanzada y sostenible en la construcción de carreteras.

CAPÍTULO III

FUNDAMENTOS CENTRALES EN TORNO A LAS FIBRAS DE BASALTO

Las fibras de basalto, producto de un proceso de fusión y extrusión de la roca ígnea homónima, constituyen un elemento fascinante en el panorama de los materiales avanzados (Wu *et al.*, 2022a). Su origen se remonta en la mitad del siglo XX, su desarrollo histórico se entrelaza con la búsqueda de alternativas sostenibles y duraderas. Estas fibras, con una composición mineralógica singular, presentan propiedades físicas y químicas notables, destacándose en resistencia mecánica, tenacidad y durabilidad en condiciones ambientales adversas.

La comparación con otras fibras, como las de vidrio o carbono, revela diferencias significativas, siendo las fibras de basalto reconocidas por su origen natural y su abundancia en la Tierra. La evolución en su uso ha llevado a su consolidación como una opción versátil y competitiva, ofreciendo ventajas tanto en términos de rendimiento como de costos (Wu, 2021).

Dentro de su procedimiento, Kou *et al.* (2022) destacan el método de producción. En este contexto, se expone sobre la extracción y procesamiento del basalto hasta el proceso de fusión y formación de fibras, destacando su versatilidad y su papel clave en diversas aplicaciones industriales. En conjunto, estos fundamentos subrayan la importancia y el potencial innovador de las fibras de basalto en el ámbito de los materiales avanzados. Asimismo, su exposición aborda una comparativa frente a otros tipos de fibra, considerando el aporte dentro de la ingeniería vial.

Las fibras de basalto no solo representan un hito en la ingeniería de materiales, sino que también encarnan la síntesis armoniosa entre innovación y sostenibilidad. Su historia, desde la investigación pionera hasta su consolidación en la actualidad, resalta la constante búsqueda de soluciones eficientes y respetuosas con el medioambiente. Las propiedades físicas y químicas excepcionales, combinadas con su comparativa favorable frente a otras fibras, demuestran su valía en numerosos contextos. Asimismo, el proceso de producción, desde la extracción del basalto hasta la formación de fibras, enfatiza su versatilidad y adaptabilidad. En este escenario, las fibras de basalto no solo son testigos de la evolución tecnológica, sino también agentes clave en la construcción de un futuro donde la eficiencia y la sostenibilidad convergen de manera armoniosa.

3.1. Definición y origen de las fibras de basalto

Según Lou *et al.* (2021a), las fibras de basalto son materiales fibrosos obtenidos mediante un proceso que implica la fusión y extrusión del basalto, una roca ígnea de origen volcánico. En este procedimiento, el basalto se somete a altas temperaturas, generalmente alrededor de 1500 °C. Posteriormente, se extruye para formar filamentos delgados y resistentes. De esta labor, se obtiene un conjunto de fibras que tienen una composición mayormente vítrea y comparten similitudes con la fibra de vidrio, aunque se distinguen por su origen en el basalto en lugar de la sílice utilizada en la fibra de vidrio.

Para Wang *et al.* (2023), la singularidad de las fibras de basalto radica en sus propiedades mecánicas, dado que ofrecen resistencia, durabilidad y versatilidad, lo que las convierte en un componente valioso para diversas aplicaciones, como la construcción y la fabricación de materiales compuestos. Además, su proceso de obtención es más respetuoso con el medioambiente en comparación con otras fibras sintéticas, puesto que no requiere la adición de productos químicos durante la fabricación y utiliza una materia prima abundante y sostenible. En este contexto, se comprende que la aplicación de fibras de basalto

compromete una mejor administración tanto a nivel de sostenibilidad como en el uso de estas.

Wu *et al.* (2022a) sostienen que el uso de fibras de basalto se respalda por la abundancia y sostenibilidad del basalto, características inherentes al material. Estas fibras exhiben propiedades mecánicas notables, como alta resistencia y durabilidad, resistencia al fuego y a la corrosión, así como una excelente estabilidad dimensional. Por consiguiente, su aplicación se extiende a diversos sectores, desde la construcción, donde mejoran la resistencia y durabilidad de mezclas asfálticas y de concreto, hasta la fabricación de materiales compuestos, aprovechando su singularidad y su origen natural en armonía con prácticas sostenibles.

En resumen, las fibras de basalto, derivadas del proceso de fusión y extrusión del basalto —una roca ígnea de origen volcánico— representan una valiosa contribución a diversas industrias. Su origen natural, sostenibilidad y propiedades mecánicas excepcionales, que incluyen resistencia, durabilidad y estabilidad dimensional, las convierten en una opción atractiva para fortalecer materiales en sectores como la construcción y la fabricación de compuestos. Este innovador recurso ofrece una alternativa sustentable, destacando por su versatilidad y capacidad para optimizar el rendimiento de distintas aplicaciones, desde mezclas asfálticas hasta componentes estructurales avanzados.

3.2. Contexto histórico y evolución de su uso

En el contexto histórico de las fibras de basalto, su origen se encuentra en los avances significativos de mediados del siglo XX, cuando los investigadores comenzaron a explorar la transformación de la roca ígnea en fibras resistentes. Este período marcó el surgimiento de la investigación y desarrollo de materiales avanzados, impulsados por la búsqueda de alternativas sostenibles y de alto rendimiento en comparación con otras fibras existentes (Lou *et al.*, 2021b).

Kou *et al.* (2020) sostienen que la intensificación de los estudios sobre las fibras de basalto se debió al reconocimiento de sus propiedades únicas, como la resistencia, durabilidad y su origen natural y abundante. A medida que la conciencia ambiental ganaba protagonismo, el basalto emergió como una opción atractiva para diversas aplicaciones industriales, incluyendo la construcción. Este hito histórico representa la evolución de los materiales hacia opciones más sostenibles y eficientes, estableciendo las fibras de basalto como un componente valioso en el ámbito de la ingeniería moderna.

A su vez, el interés creciente en la búsqueda de alternativas sostenibles y duraderas ha sido un motor clave para la innovación en la fabricación de fibras de basalto, abriendo nuevas posibilidades en la construcción y diversas industrias. La necesidad de reducir la dependencia de materiales menos sostenibles y la demanda de soluciones que ofrezcan resistencia y durabilidad sin comprometer el impacto ambiental han impulsado el desarrollo y la adopción de las fibras de basalto. Este enfoque innovador refleja un cambio significativo hacia prácticas más ecoamigables en la ingeniería y la construcción, donde las fibras de basalto emergen como una opción prometedora que combina eficiencia, rendimiento y respeto por el medioambiente (Xu *et al.*, 2022).

Desde su surgimiento a mediados del siglo XX, las fibras de basalto han evolucionado como una solución tecnológica de vanguardia que capitaliza la abundancia natural del material con beneficios superiores. A lo largo de las décadas, la investigación y la innovación en la producción de fibras de basalto han permitido su incorporación en diversas aplicaciones, desde la construcción hasta la fabricación de materiales compuestos. Su capacidad para mejorar la resistencia y durabilidad en una variedad de contextos ha consolidado su posición como una alternativa valiosa en el panorama de materiales avanzados (Chen *et al.*, 2021b).

De acuerdo con Lou *et al.* (2021c), el continuo desarrollo y perfeccionamiento de las fibras de basalto reflejan la adaptabilidad y versatilidad de este

recurso en respuesta a las demandas cambiantes de la industria y la ingeniería. Su presencia en el ámbito de los materiales compuestos y su contribución al fortalecimiento de estructuras y productos en distintos sectores subrayan la importancia de esta innovación, que ha trascendido su origen para convertirse en una pieza clave en la construcción de un futuro más sostenible y resiliente.

En ese sentido, el contexto histórico y la evolución en el uso de fibras de basalto representan un fascinante viaje desde su descubrimiento en el siglo XX hasta su posición actual como una solución tecnológica avanzada. A lo largo de las décadas, estas fibras han pasado de ser una innovación emergente a desempeñar un papel crucial en la construcción y otras industrias, gracias a su combinación única de abundancia natural, resistencia y durabilidad mejoradas. Este recorrido histórico subraya no solo la capacidad de adaptación de la tecnología, sino su contribución esencial a la creación de entornos más sostenibles y materiales más eficientes. La continua evolución en su aplicación sugiere que las fibras de basalto seguirán desempeñando un papel destacado en la conformación del futuro de los materiales avanzados.

3.3. Propiedades física y químicas de las fibras de basalto

Las propiedades físicas y químicas de las fibras de basalto ofrecen una fascinante combinación de características que las distinguen en el ámbito de los materiales compuestos. Originadas a partir de la fusión y extrusión de basalto, una roca ígnea de origen volcánico, estas fibras poseen propiedades mecánicas notables. Su composición principal es vítrea, y comparten similitudes con la fibra de vidrio, aunque la distinción clave radica en su origen basáltico en lugar de la sílice utilizada en la fibra de vidrio. Además de su resistencia y durabilidad, las fibras de basalto exhiben características como resistencia al fuego y a la corrosión, así como una excelente estabilidad dimensional. Este conjunto de propiedades abre un amplio espectro de aplicaciones en la construcción y otras

industrias, destacando su versatilidad y contribución a la ingeniería de materiales avanzados (Al-Kharabsheh *et al.*, 2022).

Ahora bien, Jiu *et al.* (2023) exponen que la composición mineralógica de las fibras de basalto refleja su origen volcánico y la transformación durante el proceso de fusión y extrusión. Principalmente, estas fibras están compuestas de minerales como plagioclasa, piroxenos y olivino, que son comunes en la roca ígnea de basalto. Estos minerales se funden a altas temperaturas, alrededor de 1500 °C, para luego ser extruidos y convertidos en filamentos finos y resistentes. La resultante mezcla de minerales confiere a las fibras de basalto su robustez y durabilidad, proporcionando propiedades excepcionales a estas fibras en términos de resistencia mecánica y estabilidad térmica.

Para Wu *et al.* (2022b), la combinación específica de minerales en las fibras de basalto contribuye a su capacidad para resistir altas temperaturas, lo que es especialmente valioso en aplicaciones donde se enfrentan a condiciones térmicas extremas. Además, la resistencia a la corrosión y la estabilidad dimensional de estas fibras se derivan directamente de su composición mineralógica única, convirtiéndolas en una elección destacada en la ingeniería de materiales para diversas aplicaciones.

Además, la resistencia mecánica y tenacidad de las fibras de basalto son características fundamentales que las distinguen en diversas aplicaciones. Estas fibras exhiben una impresionante resistencia a la tracción y al impacto, lo que las hace excepcionalmente robustas para soportar cargas y tensiones. Su estructura fibrosa y su capacidad para dispersar las fuerzas aplicadas contribuyen a una mayor tenacidad, permitiendo que las fibras de basalto absorban energía sin comprometer su integridad (Cheng *et al.*, 2020).

La composición de alta resistencia mecánica y tenacidad hace que las fibras de basalto sean especialmente valiosas en aplicaciones donde se requiere un material resistente y duradero. Su capacidad para mejorar la resistencia y la

integridad de los materiales compuestos, así como su uso en la construcción de infraestructuras, destaca la versatilidad de estas fibras en entornos que demandan propiedades mecánicas excepcionales (Jiu *et al.*, 2023).

Por otro lado, Kou *et al.* (2022) señalan que la durabilidad de las fibras de basalto frente a condiciones ambientales adversas es una característica distintiva que las hace altamente apreciadas en diversas aplicaciones. Estas fibras exhiben una excelente resistencia a la corrosión, al ataque químico y a la degradación causada por la exposición a ambientes agresivos. La composición mineralógica única del basalto contribuye a su resistencia intrínseca, lo que les permite mantener su integridad estructural incluso en presencia de factores como la humedad, los cambios de temperatura y la radiación solar intensa.

En entornos donde la durabilidad es crítica, como en construcciones de infraestructuras o componentes expuestos a condiciones climáticas adversas, las fibras de basalto demuestran su capacidad para conservar sus propiedades a lo largo del tiempo. Esta resistencia a la degradación ambiental contribuye significativamente a la vida útil prolongada de los materiales reforzados con fibras de basalto, consolidando su posición como una opción duradera y confiable en diversos campos de aplicación (Evirgen *et al.*, 2021).

En síntesis, las fibras de basalto emergen como un componente excepcional en el ámbito de los materiales compuestos, destacando por sus propiedades físicas y químicas únicas. Su composición mineralógica, resistencia mecánica y tenacidad, junto con su durabilidad frente a condiciones ambientales adversas, las posicionan como una elección valiosa en diversas aplicaciones. Estas propiedades intrínsecas ofrecen oportunidades significativas para la innovación en la construcción, la manufactura de materiales compuestos y otros sectores, donde las fibras de basalto desempeñan un papel crucial en la mejora de la resistencia y la longevidad de los materiales.

3.4. Comparación con otros tipos de fibra

En el vasto panorama de las fibras utilizadas en diversas aplicaciones, la fibra de basalto emerge como un protagonista destacado debido a sus propiedades únicas y versátiles (Hui *et al.*, 2022). Al compararla con otros tipos de fibras, como la fibra de vidrio o la fibra de carbono, se revelan diferencias significativas en términos de composición, resistencia y características físicas. Esta evaluación comparativa permite apreciar el valor distintivo de la fibra de basalto y comprender cómo se posiciona en el espectro de materiales fibrosos disponibles en la actualidad.

Wang *et al.* (2023) indican que la fibra de basalto se distingue por sus notables diferencias con respecto a otras fibras comúnmente utilizadas, como la fibra de vidrio y la fibra de carbono. En términos de composición, mientras que la fibra de vidrio se basa en la sílice y la fibra de carbono en la carbonización de materiales orgánicos, la fibra de basalto se obtiene a partir de la fusión y extrusión del basalto, una roca ígnea de origen volcánico. Esta singularidad en la fuente material influye directamente en las propiedades físicas de cada tipo de fibra.

Desde el punto de vista de las propiedades mecánicas, Kou *et al.* (2020) puntualizan que la fibra de basalto destaca por su resistencia y tenacidad, ofreciendo características intermedias entre la fibra de vidrio y la fibra de carbono. Mientras que la fibra de carbono es conocida por su alta resistencia específica y rigidez, y la fibra de vidrio es apreciada por su bajo costo y versatilidad, la fibra de basalto se erige como una opción equilibrada que combina resistencia, durabilidad y una excelente estabilidad dimensional. En este contexto, tales diferencias clave hacen que la fibra de basalto sea una elección atractiva en diversas aplicaciones donde se requiere un rendimiento excepcional y una alternativa sostenible.

De este modo, Kou *et al.* (2022) especifican que las fibras de basalto ofrecen ventajas competitivas en diversos contextos, siendo especialmente destacadas en aplicaciones que requieren resistencia, durabilidad y sostenibilidad. En comparación con la fibra de vidrio, las fibras de basalto presentan una mayor resistencia a la tracción y tenacidad, lo que las hace más adecuadas para situaciones donde se enfrentan cargas dinámicas o se requiere una mayor capacidad de absorción de energía.

Además, en términos de sostenibilidad, las fibras de basalto tienen ventajas ambientales sobre la fibra de carbono, ya que se derivan de un recurso natural abundante y no requieren el alto consumo de energía asociado con la producción de fibra de carbono. Esta característica hace que las fibras de basalto sean una elección atractiva en industrias donde la sostenibilidad y la eficiencia energética son consideraciones cruciales, como la construcción, la fabricación de vehículos y la producción de materiales compuestos avanzados. Su combinación de propiedades mecánicas robustas y beneficios ambientales las convierte en una alternativa competitiva en diversos escenarios industriales y tecnológicos (Chen *et al.*, 2023c).

Según Yan *et al.* (2020), la elección de fibras para aplicaciones específicas implica considerar cuidadosamente los requisitos y características deseadas en el material compuesto o estructura final. Las fibras de basalto son una opción ideal cuando se busca una combinación de resistencia, durabilidad y sostenibilidad. Su alta resistencia a la tracción y tenacidad las hace adecuadas para aplicaciones donde se espera una carga dinámica y una capacidad de absorción de energía crucial, como en la fabricación de componentes automotrices y aeroespaciales.

En contraste, las fibras de carbono son preferidas en situaciones donde se busca una máxima resistencia y rigidez con un peso mínimo. Este material es ampliamente utilizado en la fabricación de estructuras ligeras y de alto rendi-

miento, como en la industria aeroespacial y la construcción de vehículos deportivos. La elección entre fibras de basalto, carbono u otros tipos dependerá, por lo tanto, de los requisitos específicos del proyecto, considerando factores como el rendimiento mecánico, la sostenibilidad, el peso y las condiciones ambientales a las que estará expuesto el producto final (Al-Kharabsheh *et al.*, 2022).

Por ello, la fibra de basalto se destaca como una opción versátil y sostenible en el mundo de los materiales compuestos, ya que ofrece una combinación única de resistencia, durabilidad y beneficios ambientales. Si bien otras fibras, como la de carbono o la de vidrio, pueden tener propiedades específicas que las hacen ideales para ciertas aplicaciones, la fibra de basalto resalta en contextos donde se busca un equilibrio entre rendimiento mecánico, impacto ambiental reducido y costos competitivos. Esta elección estratégica entre diferentes tipos de fibras permite adaptar los materiales a las necesidades específicas de cada proyecto, garantizando soluciones óptimas en una variedad de industrias y aplicaciones.

3.5. Métodos de producción de fibras de basalto

De acuerdo con Yan *et al.* (2020), la producción de fibras de basalto implica un proceso tecnológico avanzado que transforma la roca ígnea de basalto en filamentos fibrosos resistentes. A través de métodos de fusión y extrusión a altas temperaturas, alrededor de 1500 °C, se logra la creación de fibras duraderas con propiedades únicas. Este proceso innovador ha abierto nuevas posibilidades en diversas industrias, proporcionando una alternativa sostenible y eficiente en la fabricación de materiales compuestos y soluciones de ingeniería avanzada. En este escenario, se contempla que la fusión y extrusión debe ser una acción ejecutada bajo temperaturas elevadas, considerando la integración de los materiales para la construcción y mantenimiento del pavimento o vía.

Para Kou *et al.* (2022), el proceso comienza con la extracción y procesamiento del basalto, piedra ígnea de origen volcánico, reconocida como etapa

fundamental en la producción de fibras de basalto. El basalto se extrae mediante métodos mineros convencionales, donde se perforan y explotan las canteras para obtener bloques de la roca. Posteriormente, estos bloques se someten a procesos de trituración y molienda para obtener tamaños específicos de partículas.

Luego se continúa con el proceso de fusión y formación de fibras de basalto, correspondiente a una fase crucial en la producción de estos materiales resistentes y versátiles. Después de la extracción y trituración del basalto, el material se introduce en hornos de fusión, donde se somete a temperaturas extremadamente elevadas, generalmente alrededor de 1500 °C. Este intenso calor provoca la fusión del basalto, transformándolo en un estado líquido (Jiu *et al.*, 2023).

Una vez que el basalto ha alcanzado el estado fundido, Xu *et al.* (2022) sostienen que el siguiente paso implica la extrusión del material. En este proceso, se utiliza una hiladora especializada para extrudir filamentos delgados y continuos a partir del basalto fundido. Estos filamentos, o fibras de basalto, son resistentes y presentan propiedades mecánicas notables. La combinación de la fusión a alta temperatura y la extrusión precisa permite obtener fibras que pueden ser utilizadas en diversas aplicaciones, desde la construcción hasta la fabricación de materiales compuestos. Este método de producción destaca por aprovechar la naturaleza abundante y sostenible del basalto, convirtiéndolo en un recurso valioso en la ingeniería de materiales.

A su vez, Al-Kharabsheh *et al.* (2023) exponen que existen dos tipos principales de fibras de basalto según su fabricación: las fibras continuas y las fibras cortas. Las fibras continuas se producen mediante el estiramiento y solidificación del basalto fundido en filamentos continuos, resultando en fibras largas y flexibles. Estas fibras continuas son ideales para aplicaciones que requieren resistencia y durabilidad, como refuerzo en materiales compuestos y productos de construcción.

Por otro lado, Al-Kharabsheh *et al.* (2022) señalan que las fibras cortas se obtienen mediante el procesamiento de filamentos más cortos de basalto. Estas fibras cortas son comúnmente utilizadas en la mezcla de materiales para mejorar propiedades específicas, como la resistencia al impacto y la cohesión. Atendiendo a este caso de la variedad en fibras de basalto, se comprende que la elección entre fibras continuas y cortas depende de los requisitos particulares de cada aplicación, destacando la versatilidad de las fibras de basalto en diversas áreas de la ingeniería y la construcción.

En conclusión, los métodos de producción de fibras de basalto, que comprenden desde la extracción y procesamiento del basalto hasta el complejo proceso de fusión y formación de fibras, demuestran la versatilidad y capacidad innovadora de esta tecnología. La diversidad en la fabricación de fibras de basalto permite adaptarse a una amplia gama de aplicaciones, desde la construcción hasta la ingeniería de materiales compuestos, ofreciendo propiedades mecánicas superiores y sostenibilidad ambiental. Este proceso integral no solo resalta las propiedades físicas únicas de las fibras de basalto, sino también su potencial para influir positivamente en el desarrollo de soluciones avanzadas en diversas industrias.

CAPÍTULO IV

ESTABILIZACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS STONE MASTIC ASPHALT UTILIZANDO FIBRAS DE BASALTO COMO SUSTITUTO DE LAS FIBRAS DE CELULOSA

La estabilización de mezclas asfálticas *stone mastic asphalt* (SMA) mediante el uso de fibras de basalto como sustituto de las fibras de celulosa, representa una alternativa prometedora. La introducción de fibras de basalto en el diseño de las mezclas asfálticas ha demostrado mejoras notables en parámetros clave. Este cambio conduce a un ligero aumento en los parámetros volumétricos, una mayor resistencia a la fatiga representada por una mejora en la TSR, y una reducción significativa en el escurrimiento del asfalto. Estos resultados sugieren que las fibras de basalto pueden desempeñar un papel beneficioso en la estabilización de mezclas SMA, y ofrecer un rendimiento superior en comparación con las fibras de celulosa convencionales (Chen *et al.*, 2023c).

Objetivos

Objetivo general

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.

Objetivos específicos

Incorporar fibras de basalto, como sustituto de las fibras de celulosa, en la mezcla asfáltica SMA a fin de mejorar los parámetros volumétricos de diseño.

Incorporar fibras de basalto como sustituto de las fibras de celulosa en la mezcla asfáltica SMA, a fin de aumentar la resistencia retenida a la tracción.

Utilizar fibras de basalto como sustituto de las fibras de celulosa en la mezcla asfáltica SMA, a fin de reducir la sensibilidad al escurrimiento del asfalto.

Metodología

Tipo, método y diseño de investigación

Esta indagación se abordó desde el tipo descriptivo-correlacional-explicativo. Asimismo, el método correspondió a estudios deductivos, con orientación aplicada y de enfoque cuantitativo. En tal aplicación, se consideró una recopilación de datos desde la retrolectiva. Respecto a su nivel, se centró en una investigación descriptiva, con diseño experimental, dado que se manipuló una de las variables y, además, es longitudinal, según el número de mediciones.

Población

Este conjunto se encontró constituido por probetas cilíndricas de 101.6 mm (4”) de diámetro y 63.5 mm (2 ½”) de altura de mezcla asfáltica SMA compactada. Estas dimensiones fueron de utilidad para alcanzar los parámetros volumétricos y, asimismo, la resistencia contenida a la tracción. Además, a través de la mezcla asfáltica SMA sin compactar, se logra el deslizamiento del ligante asfáltico.

Muestra

Se abarcó lo siguiente:

Tabla 1: Diseño muestral

Componente	Ensayo	% Fibra	% de asfalto		
			6.0%	6.5%	7.0%
Fibras de basalto	Parámetros volumétricos	0.3%	4und.	4und.	4und.
		0.4%	4und.	4und.	4und.
		0.5%	4und.	4und.	4und.
	Resistencia retenida a la tracción (TSR)	0.3%	6und.	6und.	6und.
		0.4%	6und.	6und.	6und.
		0.5%	6und.	6und.	6und.
	Esgurrimiento del ligante asfáltico	0.3%	2und.	2und.	2und.
		0.4%	2und.	2und.	2und.
		0.5%	2und.	2und.	2und.
Fibras de celulosa	Parámetros volumétricos	0.3%	4und.	4und.	4und.
		0.4%	4und.	4und.	4und.
		0.5%	4und.	4und.	4und.
	Resistencia retenida a la tracción (TSR)	0.3%	6und.	6und.	6und.
		0.4%	6und.	6und.	6und.
		0.5%	6und.	6und.	6und.
	Esgurrimiento del ligante asfáltico	0.3%	2und.	2und.	2und.
		0.4%	2und.	2und.	2und.
		0.5%	2und.	2und.	2und.

Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Variables

Variable independiente. Fibras de basalto: componente que estabiliza e impide el deslizamiento del ligante asfáltico en las mezclas SMA.

Variable dependiente. Estabilidad de la mezcla asfáltica SMA: facultad que indica el soporte de desplazamientos y malformaciones bajo cargas de servicio.

Tabla 2: Operacionalización de variables

Variable de estudio	Definición conceptual	Indicadores	Índices	Unidad	Instrumento	Herramienta
Fibras de basalto	Es un componente estabilizador que evita el escurrimiento del ligante asfáltico en las mezclas asfálticas SMA.	Fibras de basalto	Peso en función de la mezcla	%	Dosificación de la fibra mineral.	AASHTO MP 8-05 y PP 41-02.
			Longitud media de la fibra	mm		
			Espesor medio de la fibra	mm		
Estabilidad de la mezcla asfáltica SMA	Capacidad del asfalto para soportar desplazamiento y deformación bajo cargas de servicio.	Parámetros volumétricos	Contenido de vacíos (VA)	%	Determinación de parámetros volumétricos.	AASHTO PP 41-02.
			Vacíos en el agregado mineral (VMA)	%		
			Vacíos en el agregado grueso de la mezcla (VCA_{MIX})	%		
			Vacíos en el agregado grueso en condición dry-rodded (VCA_{DRC})	%		
		Resistencia retenida a la tracción	Contenido de asfalto	%	Resistencia retenida a la tracción.	AASHTO T 283.
			Razón de resistencias a la tracción (TSR)	%		
			Temperatura	°C	Ensayo de escurrimiento del asfalto.	AASHTO T 305.
			Escurrimiento del asfalto	%		

Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Técnicas e instrumentos de recojo de data

En esta exploración, se consideraron como técnicas las pruebas y ensayos en laboratorio.

Pruebas y ensayos. Los ensayos de laboratorio estandarizado se consideraron en las determinaciones de diseño AASHTO PP 41-02 (determinación de parámetros volumétricos), AASHTO MP 8-05 (requisitos de calidad de la fibra mineral), AASHTO T 283 (resistencia retenida a la tracción) y AASHTO T 350 (ensayo de escurrimiento del asfalto).

Recolección de datos. Se aplicaron los formatos de registro estandarizados de ensayos en laboratorio, correspondiente a las especificaciones de diseño. Mediante este instrumento, se recopiló la data de los ensayos elaborados.

Validez del instrumento. Los instrumentos se validaron de manera internacional mediante AASHTO.

Confiability del instrumento. Los datos son fiables debido a su correspondencia con los ensayos practicados con certificado de calibración.

Descripción de procedimientos de análisis

Se consideró como referencia de análisis las especificaciones AASHTO: MP 8-07 y AASHTO: PP 41-02, abordando el siguiente proceso:

Primero, se seleccionan los materiales.

Segundo, se escoge la gradación.

Tercero, se determinan las temperaturas de compactación y mezcla.

Cuarto, se preparan las muestras de la mezcla en cuestión.

Quinto, se determinan los parámetros volumétricos de diseño (AASHTO PP 41-02).

Sexto, se establece la resistencia retenida a la tracción (AASHTO T 283).

Séptimo, se identifica la susceptibilidad al desplazamiento del ligante asfáltico (AASHTO T 305).

Octavo, se fija el contenido de asfalto de diseño y porcentaje de fibras estabilizadoras selectas.

Selección de materiales. Se destacan los siguientes:

Agregado grueso. Se ha empleado grava triturada de $\frac{3}{4}$ de pulgada como agregado grueso, obtenida de la cantera situada en la Carretera Pedro Ruiz-Chachapoyas km 14, en la región Amazonas (Cantera Tuesta). Además, se ha garantizado que cumple con los estándares de calidad establecidos para el agregado grueso según la normativa AASHTO MP 8-07.

Figura 1: *Agregado grueso - Cantera Tuesta, Prov. Pedro Ruiz, Región Amazonas*



Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Agregado fino. Se ha manipulado arena chancada como componente para el agregado fino, obtenida de la cantera ubicada en la Carretera Pedro Ruiz-Chachapoyas km 14, en la Región Amazonas (Cantera Tuesta). Además, se ha verificado que esta arena cumple con los requisitos de calidad establecidos

para el agregado fino según la especificación de diseño de mezclas asfálticas SMA, de acuerdo con la normativa AASHTO MP 8-07.

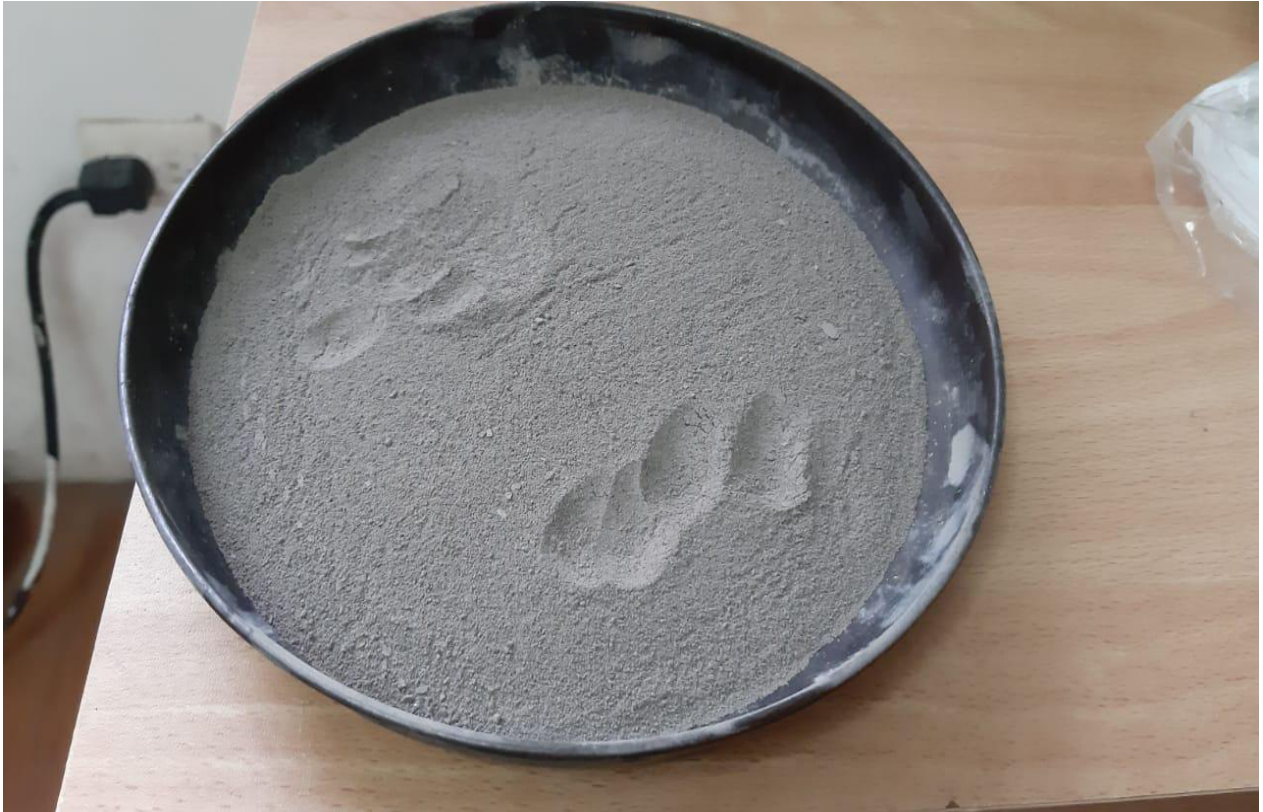
Figura 2: *Agregado fino - Cantera Tuesta, Prov. Pedro Ruiz, Región Amazonas*



Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Filler - polvo de trituración de agregados. Se ha incorporado un 5 % de polvo resultante de la trituración de agregados directamente en la mezcla asfáltica SMA, con el fin de cumplir con los requisitos de granulometría establecidos en la norma AASHTO SMA TMN 12.5mm para el tamaño de partícula en la combinación de agregados.

Figura 3: *Filler - polvo de la trituración de agregados, Cantera Tuesta - R. Amazonas*



Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Cal hidratada. Se ha empleado cal hidratada de venta comercial local, asegurándose de que esté libre de impurezas orgánicas y con un índice de plasticidad no superior a cuatro. Además, se ha tenido en cuenta utilizar no más del 2 % de cal con respecto al peso de la muestra de *stone mastic asphalt*, conforme a las recomendaciones de la bibliografía considerada en la investigación actual.

Figura 4: *Cal hidratada comercial local, Prov. Pedro Ruiz, Región Amazonas*



Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

En cuanto al ligante asfáltico, se ha empleado BETUTEC ID, eligiéndolo en función del clima cálido de la región. Los porcentajes de ligante asfáltico utilizados en el diseño de mezclas fueron del 6.0 %, 6.5 %, y 7.0 % con relación al peso de la mezcla asfáltica SMA. Las especificaciones técnicas del fabricante del ligante asfáltico se detallan en la tabla siguiente:

Tabla 3: Asfalto modificado - BETUTEC ID

Ensayos	Método ASTM	Und.	Especificaciones		Resultado
			Mínimo	Máximo	
Penetración 5s, 25°C	D-5	dmm	40	75	56
Viscosidad absoluta 60 °C	D-2171	Po	5000	--	62174
Viscosidad Cinemática 135 °C	D-2170	cSt	--	3000	1318
Punto de inflamación	D-92	°C	232	--	281
Solubilidad en tricloroetileno	D-2042	%	99	--	99.81
Viscosidad Brookfield 135 °C	D-4402	cP	--	--	1268
Viscosidad Brookfield 145 °C	D-4402	cP	--	--	760
Viscosidad Brookfield 175 °C	D-4402	cP	--	--	240
Recuperación elástica lineal Método A, 10 cm, 25 °C	D-6084	%	60	--	83
Recuperación elástica lineal Método A, 10 cm, 5 °C	D-6084	%	--	--	64.0
Punto de ablandamiento	D-36	°C	60	--	63
Estabilidad a almacenamiento 163 °C, 48 horas	D-7173				
Separación, Diferencia	D-36	°C	--	2.2	1.2
Residuo después de película fina rotatoria	D-2872				
Recuperación elástica lineal Método A, 10 cm, 25 °C	D-6084	%	60	--	75
Penetración 4 °C, 200 g, 60 s	D-5	dmm	10	--	20
Separación, Diferencia	D-36	°C	--	10	1.5

Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Figura 5: Asfalto modificado - BETUTEC ID



Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Como fibra estabilizadora, se ha incorporado fibra mineral de basalto en porcentajes del 0.3%, 0.4%, y 0.5% con respecto al peso de la mezcla asfáltica SMA. Además, se ha asegurado de cumplir con los estándares de calidad establecidos por AASHTO MP 8-05 en cuanto a la longitud y espesor de la fibra mineral. Las especificaciones técnicas proporcionadas por el fabricante de la fibra de basalto Sudaglass se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 4: Fibra de basalto Sudaglass

Ensayos	Requisito
Análisis de tamaño:	
Longitud media	6 mm
Espesor medio	13 microns
Contenido perdido:	
Pasa el tamiz de 0.250 mm (N°60)	90+/-5 por ciento

Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Figura 6: *Fibras de basalto - Sudaglass*



Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

En el diseño estándar de la mezcla asfáltica SMA, se ha incorporado fibra convencional de celulosa como estabilizadora en proporciones del 0.3 %, 0.4 %, y 0.5 % con respecto al peso total de la mezcla asfáltica SMA. Los detalles técnicos proporcionados por el fabricante de la fibra de celulosa manejada se exhiben en la Tabla 5.

Tabla 5: Fibra de celulosa VIATOP Premium

Descripción	Especificación
Nombre comercial del producto:	VIATOP Premium
Composición:	
Celulosa cruda técnica	100%
Asfalto	0%
Propiedades físicas y químicas:	
Forma	Grumos
Color	Crema
Olor	Inodoro
Temperatura de Ignición	500 °C
Densidad aparente	470 - 540 g/l
Solubilidad en agua (20 °C)	Insoluble
Descomposición térmica	200 °C aprox.
Toxicidad	Negativo

Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Figura 7: Fibras de celulosa



Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Selección de la gradación. En este proceso de investigación, se llevó a cabo inicialmente un análisis granulométrico por separado de la piedra chancada, arena chancada, filler (polvo resultante de la trituración de los agregados) y cal hidratada. Luego, se procedió a mezclar los agregados en proporciones específicas con el objetivo de cumplir con las especificaciones del tamaño de partícula establecido en el huso granulométrico SMA TMN 12.5 mm.

Tabla 6: *Proporción en peso de los agregados en la mezcla asfáltica SMA*

Tipo de agregado	Proporción en peso
Grava triturada 3/4"	75%
Arena chancada	18%
Filler - Polvo de la trituración de agregados	05%
Cal hidratada	02%

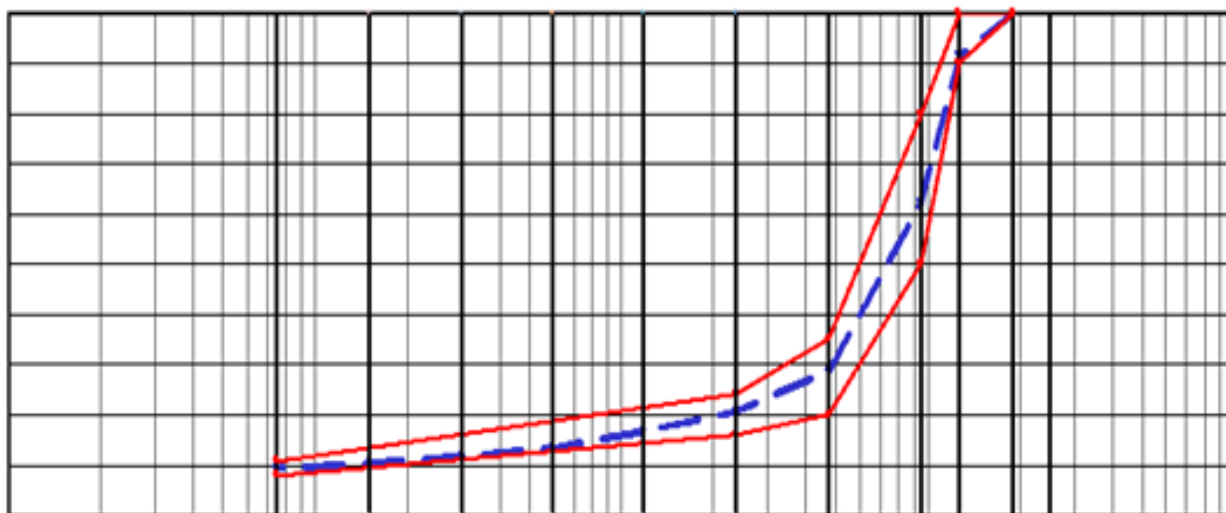
Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Tabla 7: *Combinación de agregados - Gradación AASHTO SMA TMN 12.5 mm*

TAMIZ ASTM	Abertura mm	PORCENTAJE PASANTE					Huso Granulométrico AASHTO SMA TMN 12.5mm.	
		Grava Triturada 3/4"	Arena Triturada 1/4"	Filler Polvo de roca	Filler Cal Hidratada	Total		
		75.0 %	18.0 %	5.0 %	2.0 %	100.0 %		
3"	76.200	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		
2 1/2"	63.000	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		
2"	50.000	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		
1 1/2"	37.500	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		
1"	25.000	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		
3/4"	19.000	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100	100
1/2"	12.700	88.8	100.0	100.0	100.0	91.6	90	100
3/8"	9.500	49.9	99.8	100.0	100.0	62.4	50	80
Nº 4	4.750	7.7	90.4	100.0	100.0	29.0	20	35
Nº 8	2.360	3.6	62.0	100.0	100.0	20.9	16	24
Nº 16	1.180	2.6	44.3	100.0	100.0	16.9		
Nº 30	0.600	1.0	33.0	100.0	100.0	13.7		
Nº 50	0.300	1.0	22.8	100.0	99.4	11.8		
Nº 100	0.150	1.0	16.0	98.5	98.3	10.5		
Nº 200	0.075	1.0	11.1	98.0	97.0	9.6	8	11

Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

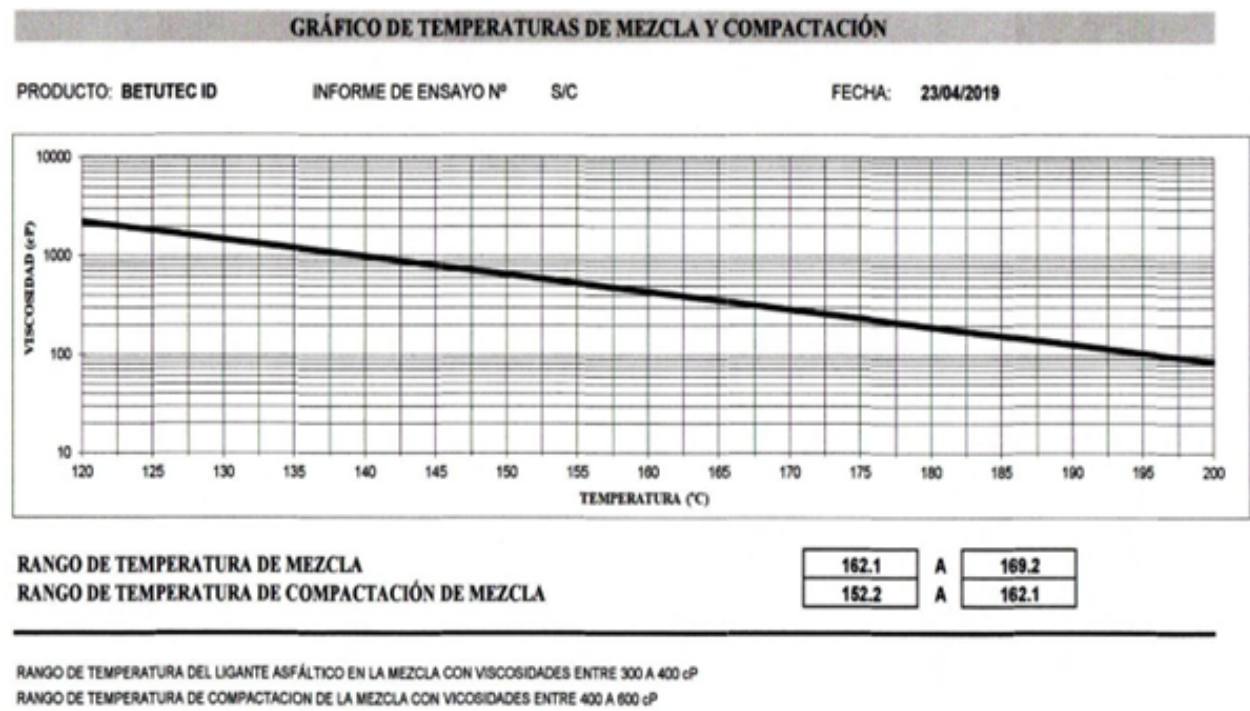
Figura 8: *Combinación de agregados - Gradación AASHTO SMA TMN 12.5 mm*



Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Determinación de las temperaturas de mezcla y comparación. Para establecer las temperaturas de mezcla y compactación, se consultó la carta de viscosidad y temperatura del BETUTEC ID empleado. Además, se tuvieron en cuenta las recomendaciones del fabricante, que sugiere una temperatura de mezcla entre 162.1 °C y 169.2 °C, y una temperatura de compactación que oscile entre 152.2 °C y 162.1 °C.

Figura 9: Carta viscosidad/ temperatura BETUTEC ID



Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Figura 10: Determinación de las temperaturas de mezcla y compactación



Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Preparación de las muestras de la mezcla asfáltica SMA. Se necesitó un total de 12 muestras para llevar a cabo el análisis de los parámetros volumétricos, distribuyéndolas según cada porcentaje de fibra estabilizadora. Este número incluye la preparación de tres muestras compactadas y una muestra no compactada (manipulada para establecer la densidad máxima teórica) para cada uno de los tres contenidos de aglutinante. Las muestras compactadas se confeccionaron utilizando el martillo Marshall con 50 golpes en cada cara, en probetas cilíndricas de 101.6 mm (4”) de diámetro y 63.5 mm (2 ½”) de altura.

Asimismo, se requirió de seis muestras para llevar a cabo el análisis de la resistencia retenida a la tracción en cada porcentaje de fibra estabilizadora. Este número contempla tres muestras compactadas sometidas a ensayos en seco y tres muestras compactadas acondicionadas. Las muestras compactadas se prepararon utilizando el martillo Marshall, manteniendo un rango de vacíos entre el 6% y el 8%, en probetas cilíndricas de aproximadamente 101.6 mm (4”) de diámetro y 63.5 mm (2 ½”) de altura.

Finalmente, se solicitaron dos muestras para analizar el escurrimiento del ligante asfáltico en cada porcentaje de fibra estabilizadora. Este número incluye dos muestras sueltas sometidas a ensayos, y el resultado del ensayo es el promedio de ambas muestras.

Figura 11: *Preparación de las muestras de la mezcla asfáltica SMA*



Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Figura 12: *Muestras de la mezcla asfáltica SMA para el ensayo TSR*



Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Determinación de los parámetros volumétricos de diseño (AASH-TO PP 41-02). Se han calculado los parámetros volumétricos de diseño para las mezclas asfálticas SMA a partir de las muestras compactadas con fibras de basalto y con fibras de celulosa en sus distintos porcentajes de prueba. Estos parámetros incluyen los vacíos de aire (V_a), los vacíos en el agregado mineral (VMA), los vacíos en el agregado grueso de la mezcla compactada (VCA-MIX), los vacíos en el agregado grueso en la prueba dry-rodded (VCADRC) y el contenido de asfalto.

Figura 13: *Determinación de los parámetros volumétricos de diseño*



Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Determinación de la resistencia retenida a la tracción (AASHTO T 283). Para cada tipo de fibra evaluada y en sus distintos porcentajes en peso dentro de la mezcla asfáltica SMA, se realizaron pruebas de tracción indirecta en muestras compactadas en seco (3 muestras por cada porcentaje de asfalto y fibra) y en muestras compactadas y acondicionadas según la normativa AASH-TO T 283 (3 muestras por cada porcentaje de asfalto y fibra). Luego, se calculó el promedio de los resultados de las muestras secas y acondicionadas, con el fin

de obtener la resistencia retenida a la tracción (TSR) para cada porcentaje de asfalto y fibra.

Figura 14: *Determinación de la resistencia retenida a la tracción*



Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Determinación de la susceptibilidad al desplazamiento del ligante asfáltico (AASHTO T 305). Para cada tipo de fibra evaluada y en sus diferentes proporciones en el peso de la mezcla asfáltica SMA, se ha introducido la muestra suelta en un contenedor de peso conocido. Luego, la muestra, la cesta y la placa o recipiente se colocaron en un horno durante un tiempo específico a la temperatura de producción. Al finalizar el periodo de calentamiento, se retiró la cesta que contiene la muestra del horno, junto con la placa o contenedor, y se determinó el peso de la placa o contenedor. La cantidad de escurrimiento se definió como la parte del material que se separa de la muestra original y se deposita fuera de la cesta de alambre. El material que escurre puede componerse por aglutinante o una combinación de aglutinante y agregado fino. Se realizó este procedimiento en dos muestras, y luego se determina el escurrimiento del ligante asfáltico tomando el promedio de los dos resultados obtenidos en cada caso.

Figura 15: *Determinación de la susceptibilidad al deslizamiento del ligante asfáltico*



Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Determinación del contenido de asfalto de diseño y porcentaje de fibras estabilizadoras selectas. En el proceso de análisis que incluye la evaluación de parámetros volumétricos, la resistencia retenida a la tracción y la susceptibilidad al escurrimiento del ligante asfáltico, siguiendo la especificación AASHTO para las mezclas asfálticas SMA con fibras de basalto y fibras de celulosa, se han establecido los contenidos de asfalto de diseño y los porcentajes óptimos de fibras estabilizadoras respectivamente.

Resultados y análisis

Resultados de parámetros volumétricos de diseño

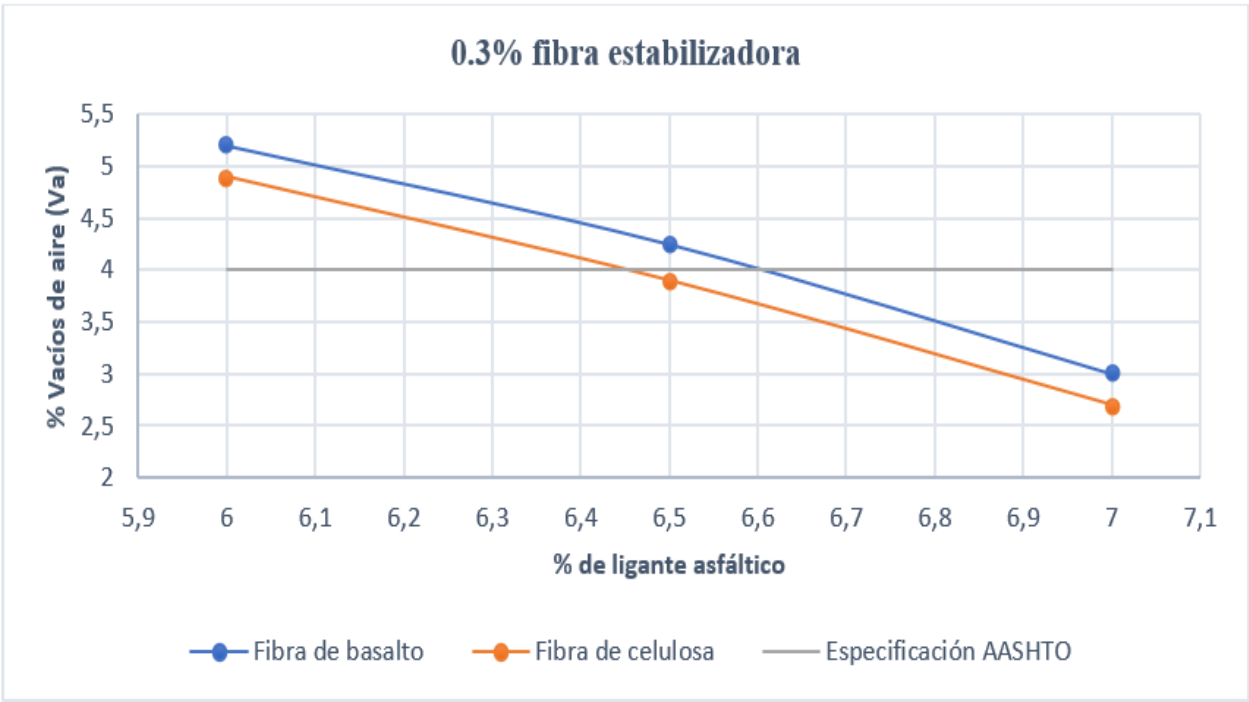
Vacíos de aire (Va). Con relación a los resultados de los vacíos de aire, se presentan los valores obtenidos para porcentajes de ligante asfáltico del 6.0%, 6.5%, y 7.0%, así como para porcentajes de fibra estabilizadora, tanto de basalto como de celulosa, en los niveles de 0.3 %, 0.4 % y 0.5 %.

Tabla 8: Resultados de Va a 0.3 % de fibra estabilizadora

0.3 % de fibra estabilizadora			
Fibra de basalto (Longitud media 6mm, Espesor medio 13 microns)		Fibra de celulosa	
% asfalto	% Vacíos de aire (Va)	% asfalto	% Vacíos de aire (Va)
6	5.2	6	4.9
6.5	4.3	6.5	3.9
7	3	7	2.7

Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Figura 16: Resultados de Va a 0.3 % de fibra estabilizadora



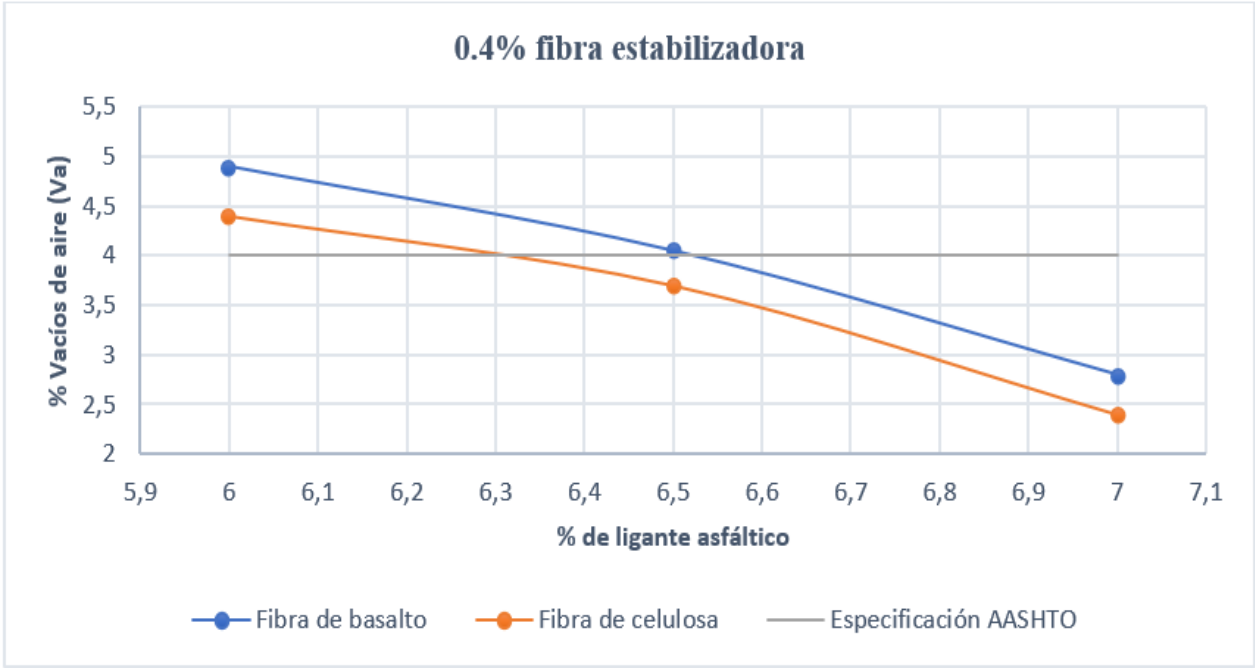
Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Tabla 9: Resultados de Va a 0.4 % de fibra estabilizadora

0.4% de fibra estabilizadora			
Fibra de basalto (Longitud media 6mm, Espesor medio 13 microns)		Fibra de celulosa	
% asfalto	% Vacíos de aire (Va)	% asfalto	% Vacíos de aire (Va)
6	4.9	6	4.4
6.5	4.1	6.5	3.7
7	2.8	7	2.4

Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Figura 17: Resultados de Va a 0.4 % de fibra estabilizadora



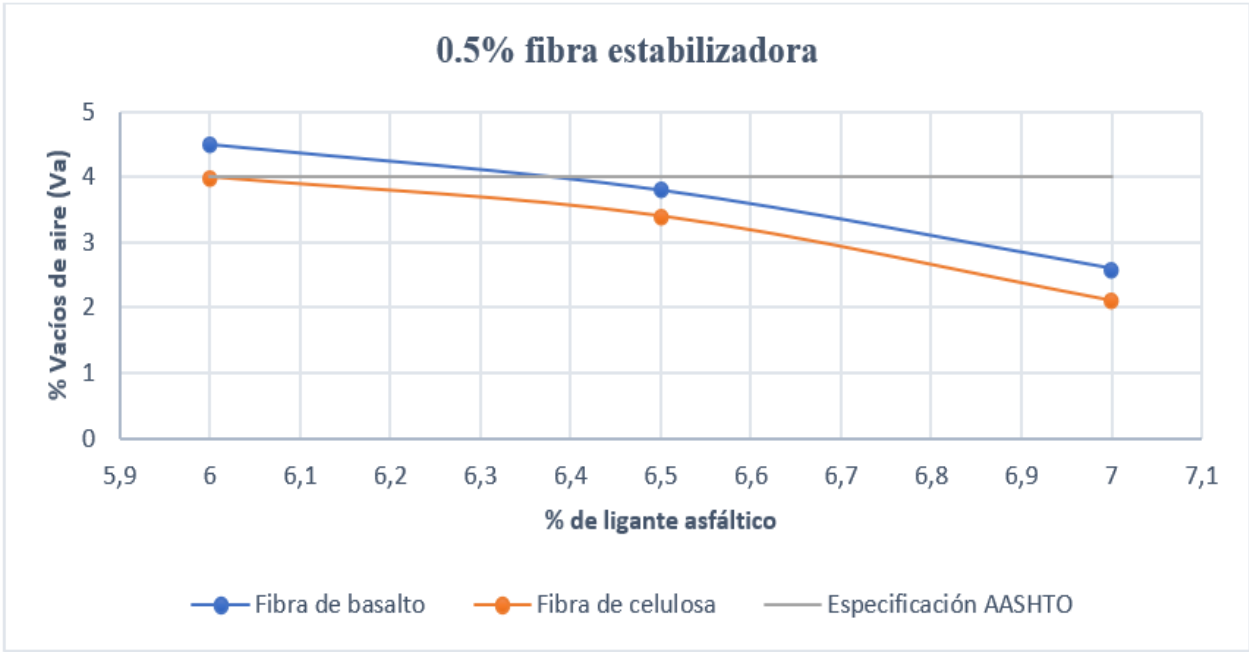
Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Tabla 10: Resultados de Va a 0.5 % de fibra estabilizadora

0.5% de fibra estabilizadora			
Fibra de basalto (Longitud media 6mm, Espesor medio 13 microns)		Fibra de celulosa	
% asfalto	% Vacíos de aire (Va)	% asfalto	% Vacíos de aire (Va)
6	4.5	6	4
6.5	3.8	6.5	3.4
7	2.6	7	2.1

Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Figura 18: Resultados de Va a 0.5 % de fibra estabilizadora



Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

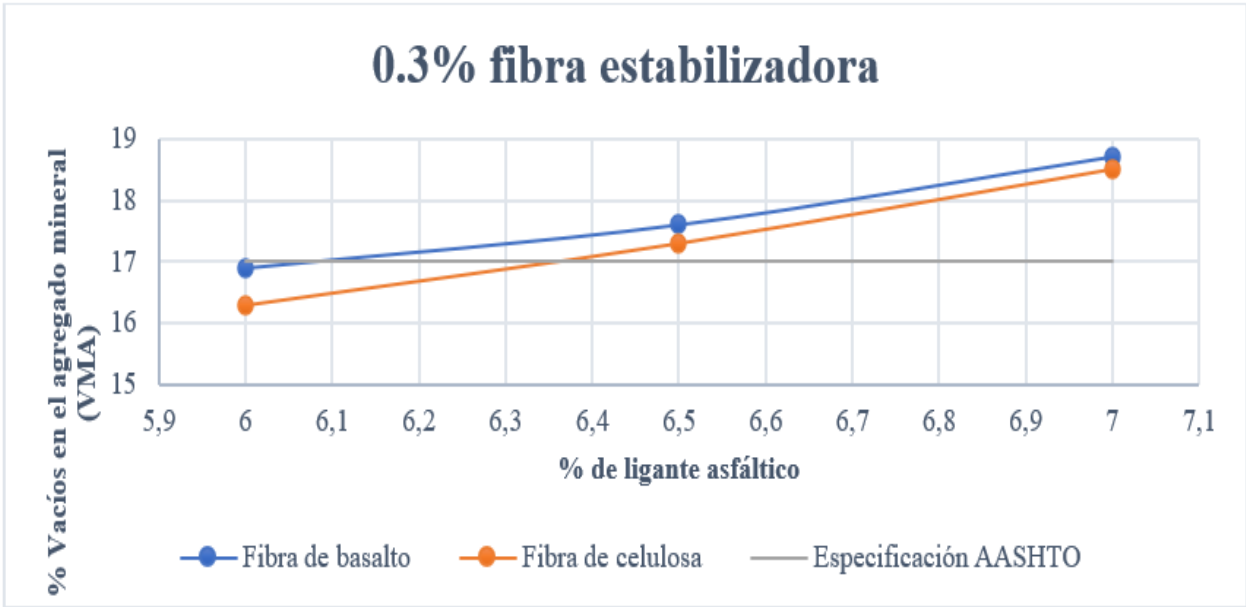
Vacíos de agregado mineral (VMA). En relación con los resultados de los vacíos en el agregado mineral, se presentan los valores obtenidos para porcentajes de ligante asfáltico del 6.0 %, 6.5 %, y 7.0 %, así como para porcentajes de fibra estabilizadora, tanto de basalto como de celulosa, en los niveles de 0.3 %, 0.4 %, y 0.5 %.

Tabla 11: Resultados de VMA a 0.3 % de fibra estabilizadora

0.3% de fibra estabilizadora			
Fibra de basalto (Longitud media 6mm, Espesor medio 13 microns)		Fibra de celulosa	
% asfalto	% Vacíos en el agregado mineral (VMA)	% asfalto	% Vacíos en el agregado mineral (VMA)
6	16.9	6	16.3
6.5	17.6	6.5	17.3
7	18.7	7	18.5

Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Figura 19: Resultados de VMA a 0.3 % de fibra estabilizadora



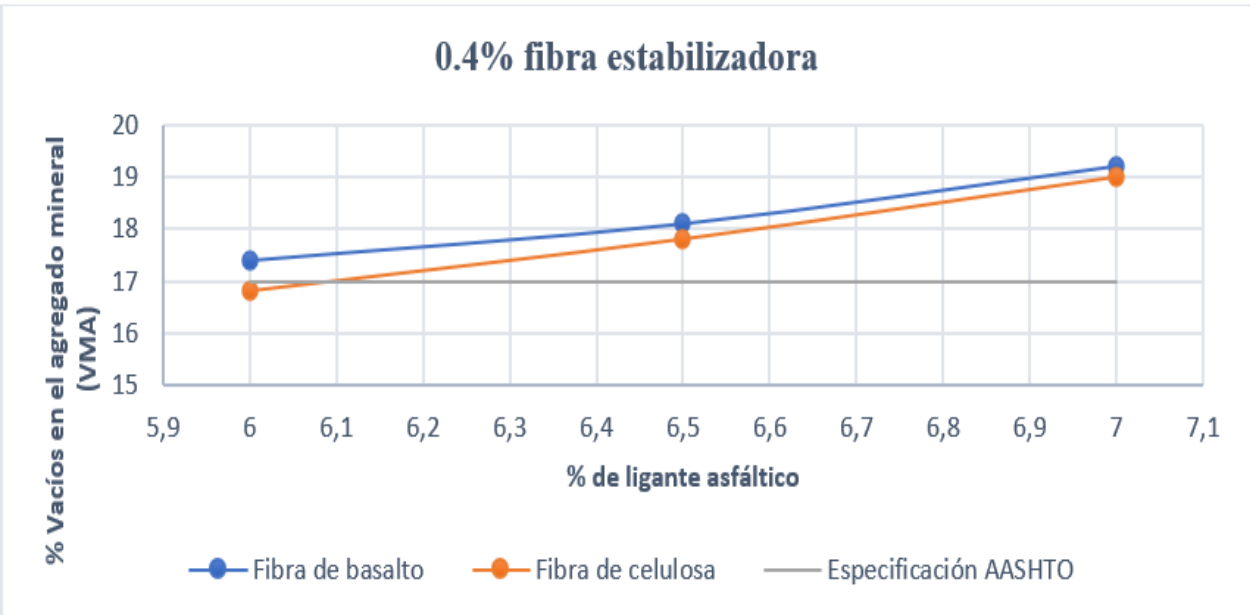
Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Tabla 12: Resultados de VMA a 0.4 % de fibra estabilizadora

0.4% de fibra estabilizadora			
Fibra de basalto (Longitud media 6mm, Espesor medio 13 microns)		Fibra de celulosa	
% asfalto	% Vacíos en el agregado mineral (VMA)	% asfalto	% Vacíos en el agregado mineral (VMA)
6	17.4	6	16.8
6.5	18.1	6.5	17.8
7	19.2	7	19

Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Figura 20: Resultados de VMA a 0.4 % de fibra estabilizadora



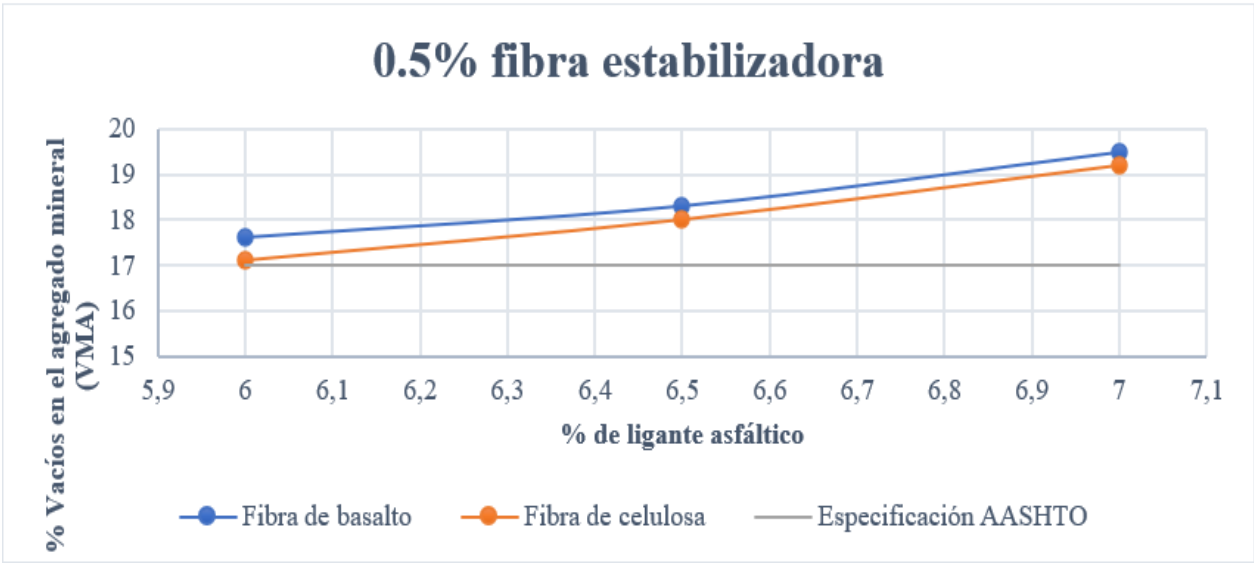
Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Tabla 13: Resultados de VMA a 0.5% de fibra estabilizadora

0.5% de fibra estabilizadora			
Fibra de basalto (Longitud media 6mm, Espesor medio 13 microns)		Fibra de celulosa	
% asfalto	% Vacíos en el agregado mineral (VMA)	% asfalto	% Vacíos en el agregado mineral (VMA)
6	17.6	6	17.1
6.5	18.3	6.5	18
7	19.5	7	19.2

Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Figura 21: Resultados de VMA a 0.5% de fibra estabilizadora



Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

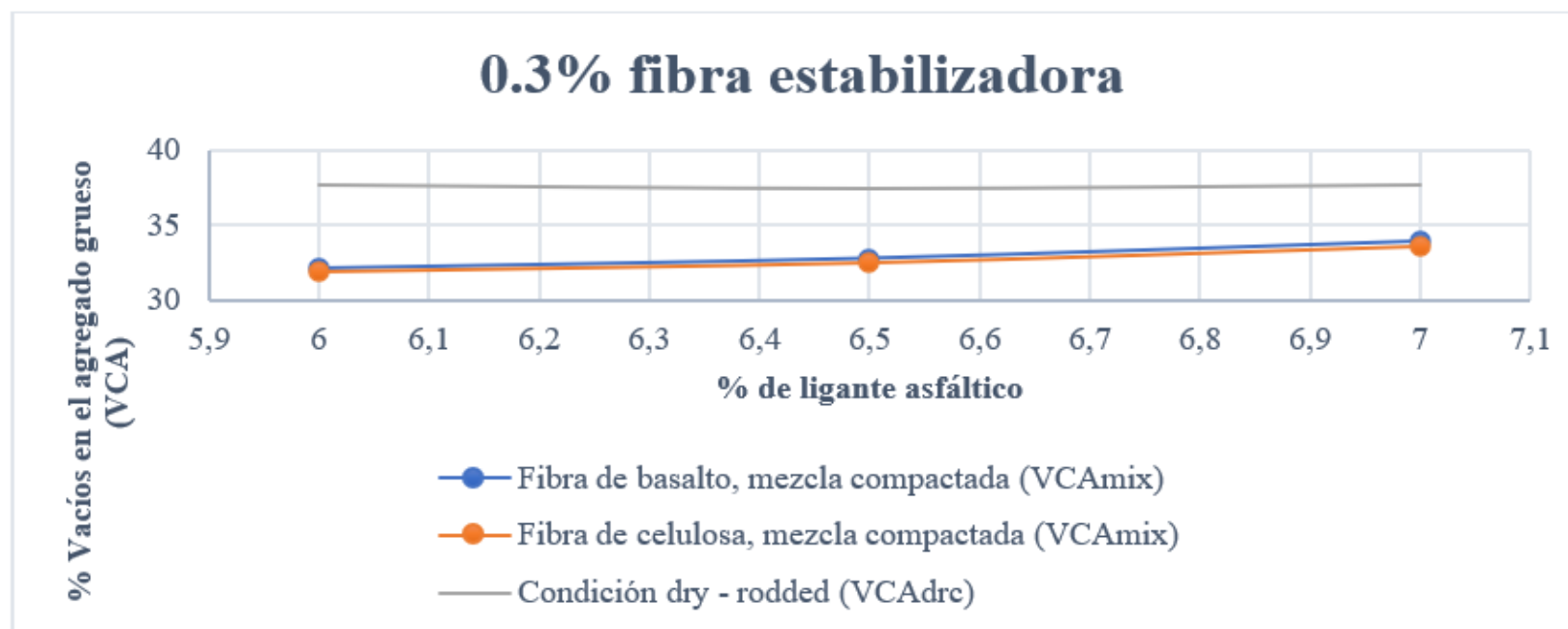
Vacío en el agregado grueso en la mezcla compacta (VCAMIX) y vacíos del agregado grueso en la condición dry-rodded (VCADRC). En relación con los resultados de estos parámetros volumétricos de diseño, se observan los siguientes valores para porcentajes de ligante asfáltico de 6.0 %, 6.5 % y 7.0 %, así como para porcentajes de fibras estabilizadoras de 0.3 %, 0.4 % y 0.5 %, tanto para la fibra de basalto como para la fibra de celulosa.

Tabla 14: Resultados de vacíos en el agregado grueso a 0.3 % de fibra estabilizadora

0.3% de fibra estabilizadora					
Fibra de basalto		Fibra de celulosa		Ambas fibras	
% asfalto	% Vacíos en el agregado grueso en la mezcla compactada (VCAmix)	% asfalto	% Vacíos en el agregado grueso en la mezcla compactada (VCAmix)	% asfalto	% Vacíos en el agregado grueso condición dry - rodded (VCAdrc)
6	32.1	6	31.9	6	37.7
6.5	32.8	6.5	32.5	6.5	37.5
7	34	7	33.6	7	37.7

Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Figura 22: Resultados de vacíos en el agregado grueso a 0.3% de fibra estabilizadora



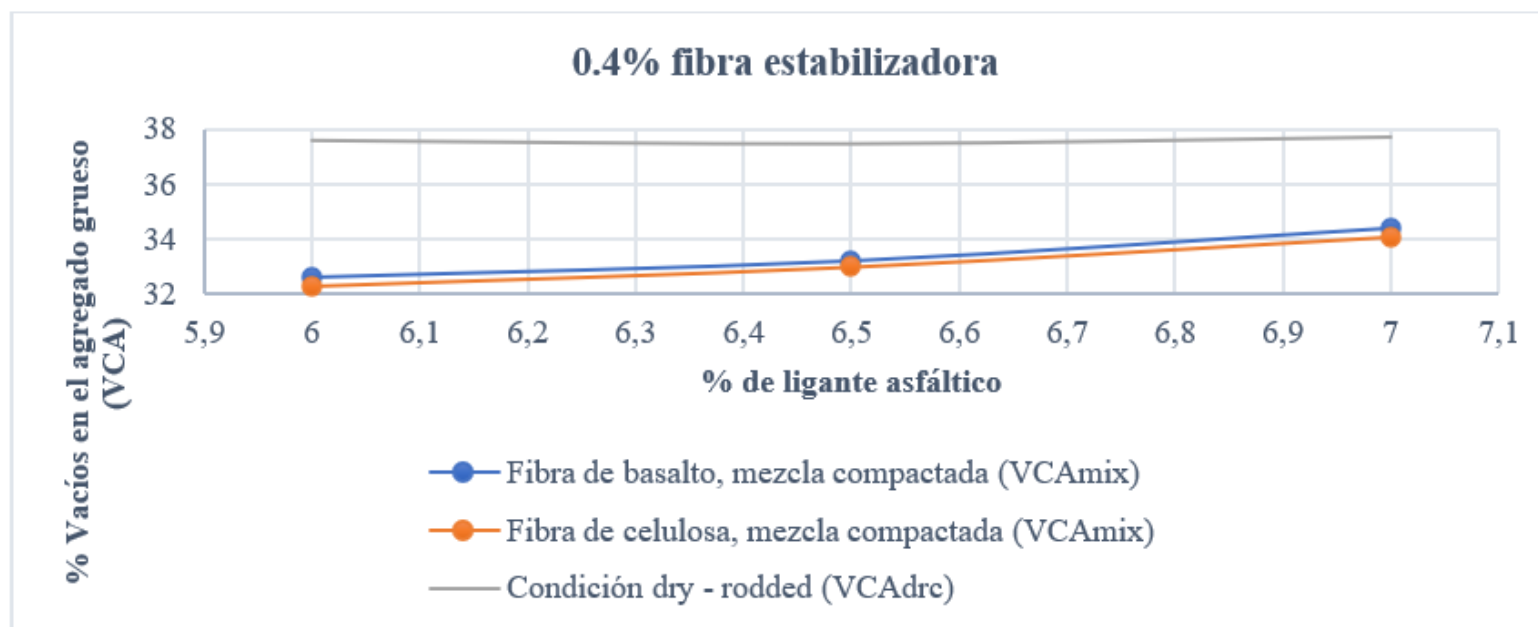
Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Tabla 15: Resultados de vacíos en el agregado grueso a 0.4% de fibra estabilizadora

0.4% de fibra estabilizadora					
Fibra de basalto		Fibra de celulosa		Ambas fibras	
% asfalto	% Vacíos en el agregado grueso en la mezcla compactada (VCAmix)	% asfalto	% Vacíos en el agregado grueso en la mezcla compactada (VCAmix)	% asfalto	% Vacíos en el agregado grueso condición dry - rodded (VCAdrc)
6	32.6	6	32.3	6	37.6
6.5	33.2	6.5	33	6.5	37.5
7	34.4	7	34.1	7	37.7

Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Figura 23: Resultados de vacíos en el agregado grueso a 0.4% de fibra estabilizadora



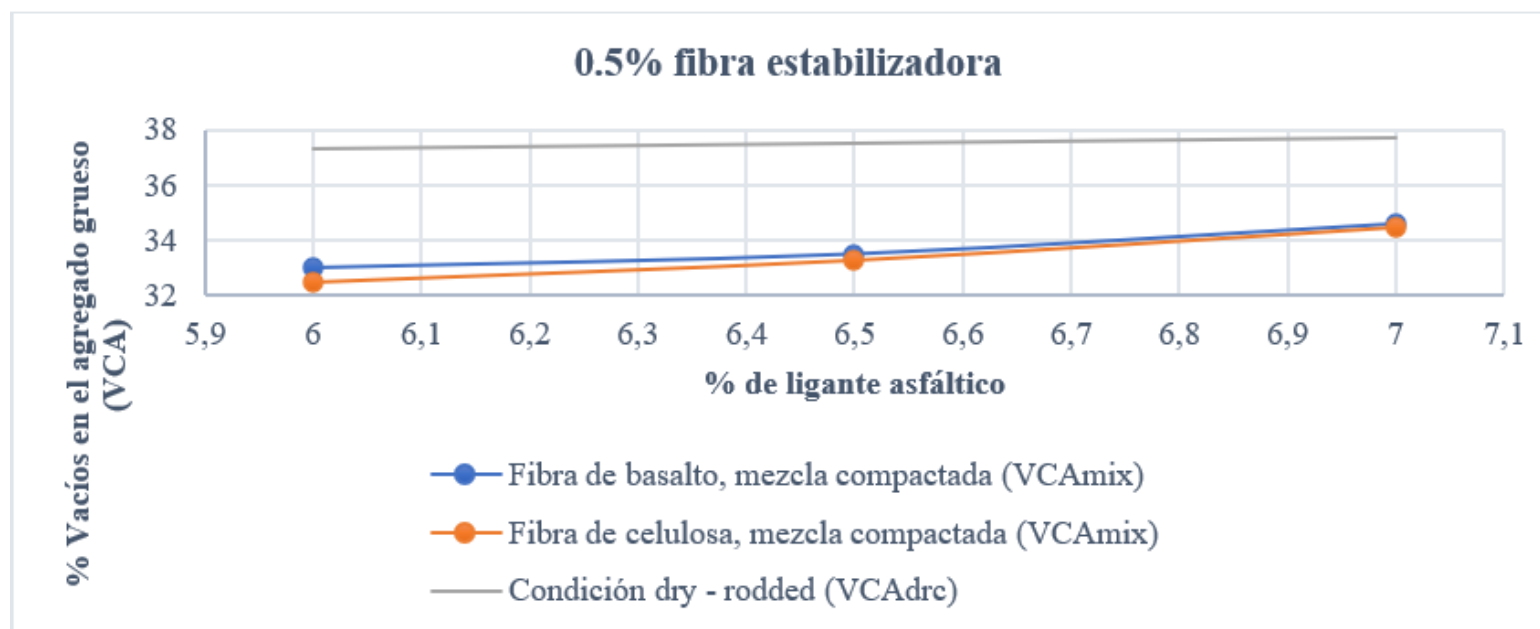
Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Tabla 16: Resultados de vacíos en el agregado grueso a 0.5 % de fibra estabilizadora

0.5% de fibra estabilizadora					
Fibra de basalto		Fibra de celulosa		Ambas fibras	
% asfalto	% Vacíos en el agregado grueso en la mezcla compactada (VCAmix)	% asfalto	% Vacíos en el agregado grueso en la mezcla compactada (VCAmix)	% asfalto	% Vacíos en el agregado grueso condición dry - rodded (VCAdrc)
6	33	6	32.5	6	37.3
6.5	33.5	6.5	33.3	6.5	37.5
7	34.6	7	34.5	7	37.7

Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Figura 24: Resultados de vacíos en el agregado grueso a 0.5 % de fibra estabilizadora



Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Resultados de resistencia retenida a la tracción (TSR)

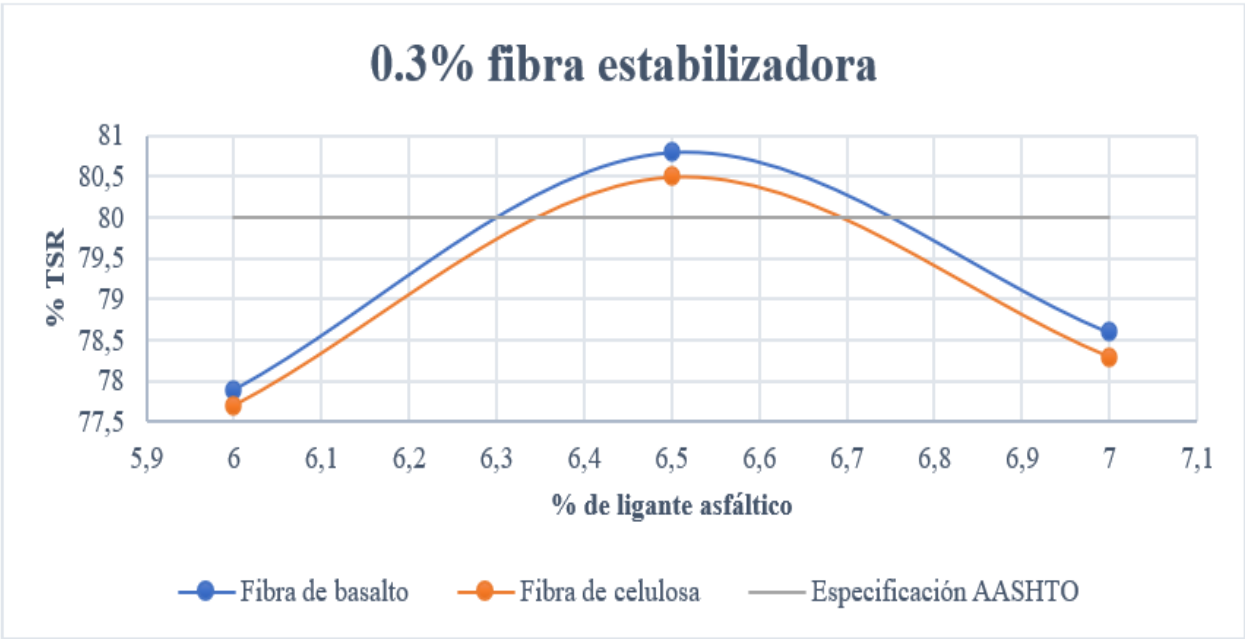
En relación con los resultados de la resistencia retenida a la tracción de las muestras de SMA, se exhiben los valores obtenidos para porcentajes de ligante asfáltico de 6.0 %, 6.5 %, y 7.0 %, así como para porcentajes de fibras estabilizadoras (ya sea de basalto o celulosa) en los niveles de 0.3 %, 0.4 %, y 0.5 %.

Tabla 17: Resultados de TSR a 0.3 % de fibra estabilizadora

0.3% de fibra estabilizadora			
Fibra de basalto (Longitud media 6mm, Espesor medio 13 microns)		Fibra de celulosa	
% asfalto	% TSR	% asfalto	% TSR
6	77.9	6	77.7
6.5	80.8	6.5	80.5
7	78.6	7	78.3

Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Figura 25: Resultados de TSR a 0.3 % de fibra estabilizadora



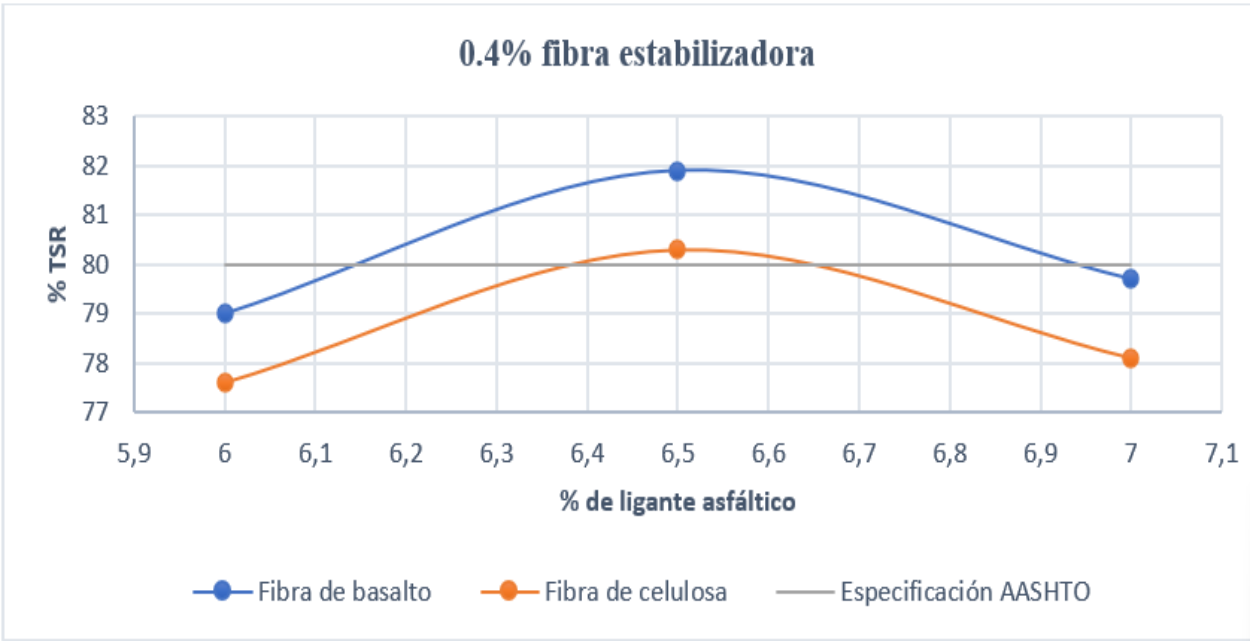
Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Tabla 18: Resultados de TSR a 0.4 % de fibra estabilizadora

0.4% de fibra estabilizadora			
Fibra de basalto (Longitud media 6mm, Espesor medio 13 microns)		Fibra de celulosa	
% asfalto	% TSR	% asfalto	% TSR
6	79	6	77.6
6.5	81.9	6.5	80.3
7	79.7	7	78.1

Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Figura 26: Resultados de TSR a 0.4 % de fibra estabilizadora



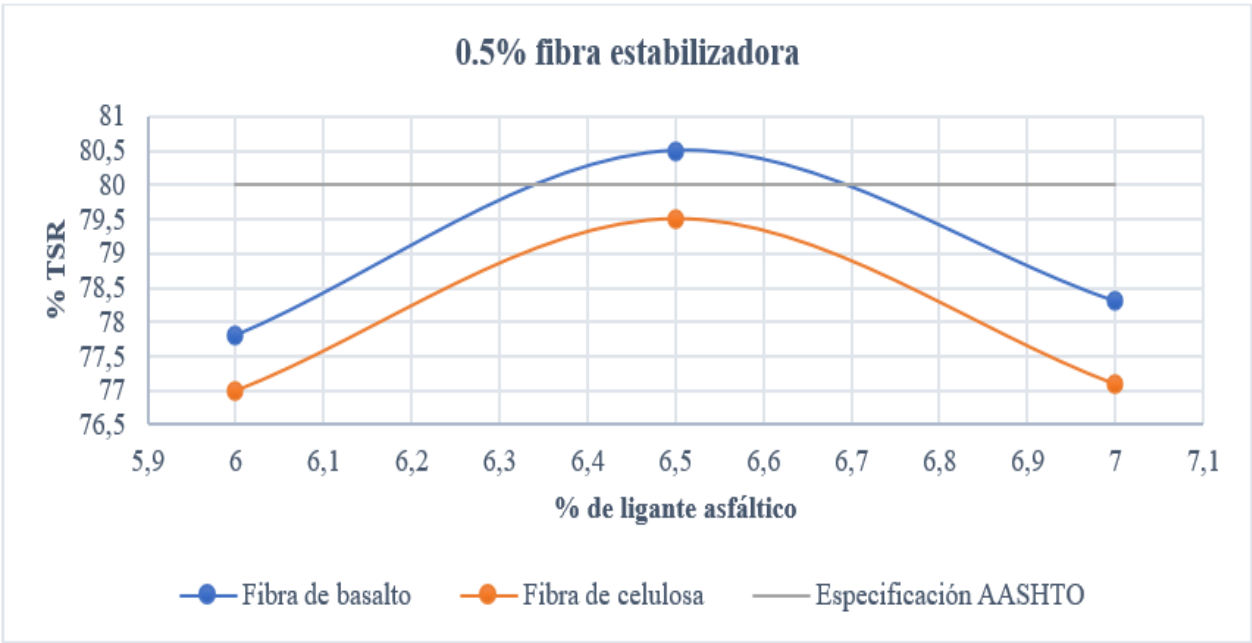
Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Tabla 19: Resultados de TSR a 0.5 % de fibra estabilizadora

0.5% de fibra estabilizadora			
Fibra de basalto (Longitud media 6mm, Espesor medio 13 microns)		Fibra de celulosa	
% asfalto	% TSR	% asfalto	% TSR
6	77.8	6	77
6.5	80.5	6.5	79.5
7	78.3	7	77.1

Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Figura 27: Resultados de TSR a 0.5 % de fibra estabilizadora



Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

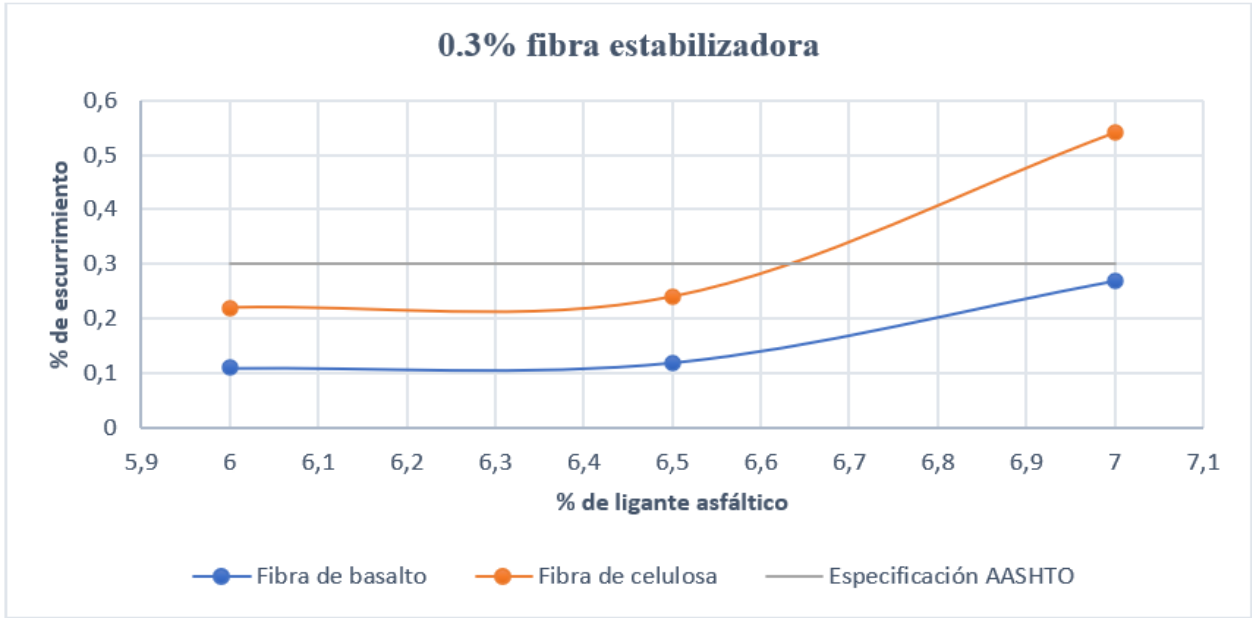
Resultados de la susceptibilidad al escurrimiento del ligante asfáltico

Tabla 20: Resultados de escurrimiento del ligante asfáltico a 0.3% de fibra estabilizadora

0.3% de fibra estabilizadora - Temperatura 162.1 °C a 169.2 °C			
Fibra de basalto (Longitud media 6mm, Espesor medio 13 microns)		Fibra de celulosa	
% asfalto	% escurrimiento	% asfalto	% escurrimiento
6	0.11	6	0.22
6.5	0.12	6.5	0.24
7	0.27	7	0.54

Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Figura 28: Resultados de escurrimiento del ligante asfáltico a 0.3 % de fibra estabilizadora



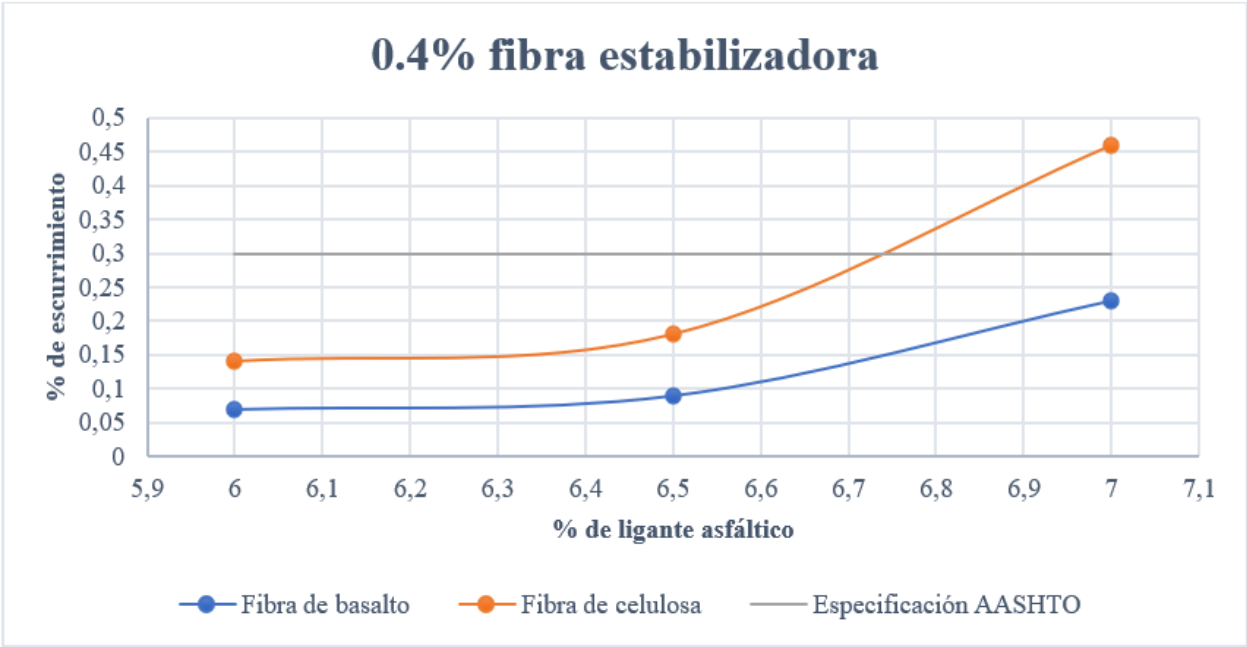
Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Tabla 21: Resultados de escurrimiento del ligante asfáltico a 0.4 % de fibra estabilizadora

0.4% de fibra estabilizadora - Temperatura 162.1 °C a 169.2 °C			
Fibra de basalto (Longitud media 6mm, Espesor medio 13 microns)		Fibra de celulosa	
% asfalto	% escurrimiento	% asfalto	% escurrimiento
6	0.07	6	0.14
6.5	0.09	6.5	0.18
7	0.23	7	0.46

Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Figura 29: Resultados de escurrimiento del ligante asfáltico a 0.4% de fibra estabilizadora



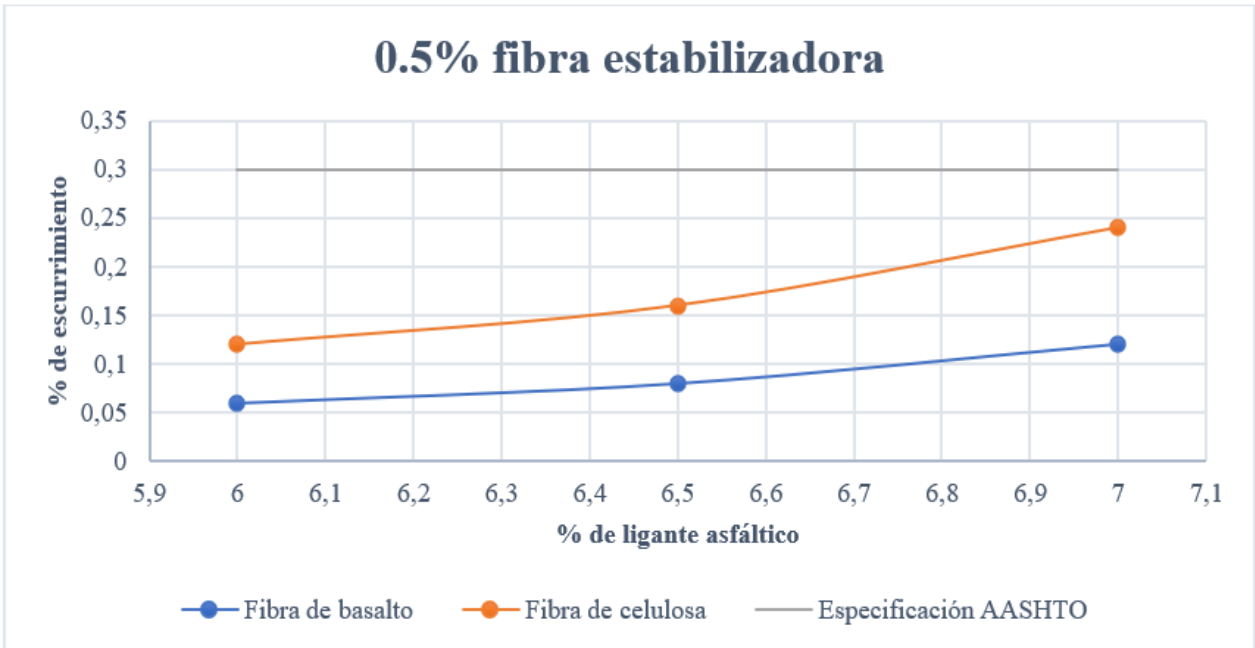
Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Tabla 22: Resultados de escurrimiento del ligante asfáltico a 0.5 % de fibra estabilizadora

0.5% de fibra estabilizadora - Temperatura 162.1 °C a 169.2 °C			
Fibra de basalto (Longitud media 6mm, Espesor medio 13 microns)		Fibra de celulosa	
% asfalto	% escurrimiento	% asfalto	% escurrimiento
6	0.06	6	0.12
6.5	0.08	6.5	0.16
7	0.12	7	0.24

Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Figura 30: Resultados de escurrimiento del ligante asfáltico a 0.5% de fibra estabilizadora



Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Análisis de resultados o discusión de resultados

Según la información proporcionada en las Figuras 16, 17 y 18 de los resultados de la investigación, se puede inferir que, para un contenido de vacíos

(Va) del 4% (valor de diseño según la especificación AASHTO), las mezclas asfálticas SMA con fibras de basalto al 0.3%, 0.4% y 0.5% en peso con respecto al peso total de la mezcla presentan contenidos de ligante asfáltico del 6.60%, 6.52% y 6.39% respectivamente. En comparación, las mezclas asfálticas SMA con fibra de celulosa al 0.3%, 0.4% y 0.5% en peso con respecto al peso total de la mezcla muestran contenidos de ligante asfáltico del 6.45%, 6.32% y 6.00% respectivamente. Por lo tanto, se puede afirmar que la mezcla asfáltica SMA con fibra de basalto tiene un mayor contenido de asfalto en comparación con la mezcla con fibra de celulosa. Este hallazgo coincide con la investigación de Zheng *et al.* (2014), quienes sostienen que la proporción óptima de betún en las mezclas de asfalto reforzadas con fibra de basalto es mayor que en las mezclas de asfalto convencionales.

Tabla 23: Análisis de resultados de Va

Restricción de diseño AASHTO: 4% de vacíos de aire (Va)		
% Fibra	Fibra de basalto	Fibra de celulosa
	% de ligante asfáltico	% de ligante asfáltico
0.3	6.60	6.45
0.4	6.52	6.32
0.5	6.39	6.00

Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

De acuerdo con la información extraída de las Figuras 19, 20 y 21 de los resultados de la investigación, se observa que las muestras de mezclas asfálticas SMA con fibras de basalto muestran un ligero aumento en el porcentaje de VMA en comparación con las mezclas asfálticas SMA con fibras de celulosa. Además, al analizar las combinaciones resultantes de la investigación (porcentaje de fibra estabilizadora vs. porcentaje de ligante asfáltico) con un 4% de porcentaje de vacíos de aire, se cumple plenamente con la restricción de la es-

pecificación AASHTO de VMA > 17%. Sin embargo, se destaca que la mezcla con fibra de basalto cumple con esta restricción de manera más favorable.

Tabla 24: Análisis de resultados de VMA

Restricción de diseño AASHTO: 4% de vacíos de aire (Va) y vacíos en el agregado mineral (VMA) > 17%				
% Fibra	Fibra de basalto	Fibra de celulosa	Fibra de basalto	Fibra de celulosa
	% de ligante asfáltico	% de ligante asfáltico	% VMA	% VMA
0.3	6.60	6.45	17.80	17.15
0.4	6.52	6.32	18.20	17.40
0.5	6.39	6.00	18.10	17.10

Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

De acuerdo con la información obtenida de las Figuras 22, 23 y 24 de los resultados de la investigación, se concluye que al comparar el porcentaje de VCAmix con los VCAdrc, las combinaciones resultantes de la investigación (porcentaje de fibra estabilizadora vs. porcentaje de ligante asfáltico) con un 4% de porcentaje de vacíos de aire cumplen totalmente con la restricción de la especificación AASHTO de VCAmix > VCAdrc. No obstante, se destaca que la mezcla con fibra de basalto cumple con esta restricción de manera más favorable.

Tabla 25: *Análisis de resultados de VCAmix y VCAdrc*

Restricción de diseño AASHTO: 4% de vacíos de aire y VCAmix < VCAdrc						
	Fibra de basalto	Fibra de celulosa	Fibra de basalto	Fibra de celulosa	Fibra de basalto	Fibra de basalto
% Fibra	% de ligante asfáltico	% de ligante asfáltico	%VCAmix	%VCAmix	%VCAdrc	%VCAdrc
0.3	6.60	6.45	33.00	32.50	37.50	37.50
0.4	6.52	6.32	33.30	32.60	37.50	37.50
0.5	6.39	6.00	33.35	32.55	37.30	37.50

Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Análisis de resultado de la resistencia retenida a la tracción (TSR)

Al analizar los resultados de los ensayos de las muestras de las mezclas asfálticas SMA con fibras de basalto, se concluye que estas presentan una menor susceptibilidad a la humedad en comparación con las mezclas asfálticas que contienen fibras de celulosa. En el caso específico de las mezclas asfálticas SMA con fibras de basalto, las combinaciones resultantes de la investigación (porcentaje de fibra estabilizadora vs. porcentaje de ligante asfáltico) con un 4% de porcentaje de vacíos de aire cumplen completamente con la restricción de la especificación AASHTO de TSR (resistencia retenida a la tracción) > 80%. Por otro lado, en cuanto a las mezclas asfálticas SMA con fibras de celulosa, solo la combinación resultante con un 0.3% de fibra y un contenido de asfalto del 6.45% cumple con la restricción establecida por la especificación AASHTO. Estos alcances son evidenciados en las Figuras 25, 26 y 27.

Tabla 26: *Análisis de resultados de TSR*

Restricción de diseño AASHTO: 4% de vacíos de aire (Va) y TSR > 80%				
% Fibra	Fibra de basalto	Fibra de celulosa	Fibra de basalto	Fibra de celulosa
	% de ligante asfáltico	% de ligante asfáltico	% TSR	% TSR
0.3	6.60	6.45	80.70	80.40
0.4	6.52	6.32	81.90	No Califica
0.5	6.39	6.00	80.35	No califica

Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Análisis de resultados de la susceptibilidad al escurrimiento del ligante asfáltico

Al evaluar los resultados de los ensayos en las muestras de las mezclas asfálticas SMA con fibras de basalto, se concluye que estas exhiben una menor susceptibilidad al escurrimiento del ligante asfáltico en comparación con las mezclas asfálticas que contienen fibras de celulosa. Todas las combinaciones resultantes de la investigación (porcentaje de fibra estabilizadora vs. porcentaje de ligante asfáltico) que cumplieran con el TSR mínimo también cumplen en su totalidad con la restricción de la especificación AASHTO de que el porcentaje de escurrimiento de ligante asfáltico sea inferior a 0.3%. Además, se observa que las mezclas asfálticas SMA con fibras de basalto ensayadas muestran un menor escurrimiento en comparación con las mezclas que contienen fibras de celulosa. Estos hallazgos se evidencian en las Figuras 28, 29 y 30.

Tabla 27: *Análisis de resultados de escurrimiento del asfalto*

Restricción de diseño AASHTO: 4% de vacíos de aire (Va) y escurrimiento del asfalto < 0.3%				
% Fibra	Fibra de basalto	Fibra de celulosa	Fibra de basalto	Fibra de celulosa
	% de ligante asfáltico	% de ligante asfáltico	% Escurrimiento del asfalto	% Escurrimiento del asfalto
0.3	6.60	6.45	0.14	0.22
0.4	6.52	6.32	0.10	0.18
0.5	6.39	6.00	0.07	0.15

Nota. Tomado de De la Cruz (2019)

Tras analizar los resultados de manera integral, se determina que la mezcla asfáltica SMA con fibra de basalto alcanza su mejor desempeño con un 0.4% de fibras y un contenido de asfalto óptimo de 6.52%. Este resultado guarda consistencia con la investigación de Kumar *et al.* (2016), quienes indican que las mezclas asfálticas SMA funcionan de manera óptima con un 6.5% de contenido de asfalto, una cifra muy cercana a la obtenida en este estudio. Además, según Sheng *et al.* (2017), el contenido ideal de fibra mineral en las mezclas asfálticas SMA debería superar el 0.4%, resaltando la versatilidad de esta fibra mineral en el diseño de la mezcla asfáltica SMA. Finalmente, Guan *et al.* (2014) concluyen que el rendimiento óptimo de las mezclas de asfalto se logra con un 0.4% de fibra mineral de brucita.

De acuerdo con los resultados de los ensayos en las muestras de mezcla asfáltica SMA, se deduce que las mezclas que contienen fibras de basalto exhiben un mejor rendimiento en comparación con aquellas que incorporan fibras de celulosa, en diversas combinaciones de fibra estabilizadora y contenido de asfalto evaluados. Esta conclusión se respalda con hallazgos de la investigación

de Dong *et al.* (2012), quienes destacan que la fibra mineral de basalto muestra un rendimiento superior en el comportamiento del pavimento en comparación con otras alternativas de fibras.

En otro sentido, para la mezcla asfáltica SMA con fibra de celulosa, se identifica que el porcentaje óptimo de fibras es del 0.3%, y el contenido de asfalto óptimo es de 6.45%. Esta observación coincide con la recomendación de Kumar *et al.* (2016), quienes sugieren trabajar con un contenido óptimo de fibras de celulosa del 0.3% en mezclas asfálticas convencionales SMA. Además, Cheng (2013) respalda esta afirmación al sugerir, basándose en los resultados de su estudio, un contenido óptimo de fibra de lignina (similar a la fibra de celulosa) del 0.33% en mezclas asfálticas SMA.

Conclusiones

En las Tablas 22, 23 y 24 se aprecia que al integrar fibras de basalto en lugar de fibras de celulosa en el diseño de las mezclas asfálticas SMA, se registra un ligero aumento en los parámetros volumétricos, como los VMA y los VCAmix. Para la configuración óptima de la mezcla asfáltica SMA con fibras de basalto, se muestra un VMA de 18.20% y un VCAmix de 33.30%, comparado con un VMA de 17.15% y un VCAmix de 32.50% con fibras de celulosa. Esto implica un incremento del 6.12% y 2.46%, respectivamente, en relación con la muestra estándar con fibras de celulosa. Además, la utilización de fibras de basalto en el diseño óptimo de las mezclas asfálticas SMA implica un mayor porcentaje de ligante asfáltico del 6.52%, en comparación con el 6.45% con fibras de celulosa, representando un aumento del 1.09% respecto a la muestra estándar. En cuanto a los VCAdrc, tanto para las mezclas asfálticas con fibras de basalto como de celulosa se obtuvo un valor de 37.50%.

La introducción de fibras de basalto en lugar de fibras de celulosa en el diseño de las mezclas asfálticas SMA generó un aumento considerable en la

TSR. En el diseño óptimo con fibras de basalto, se alcanzó un valor de 81.90%, en comparación con el 80.70% obtenido en el diseño óptimo con fibras de celulosa. Esto representa un incremento del 1.49% en relación con la muestra estándar, según lo indicado en la Tabla 26 de la exploración.

La inclusión de fibras de basalto en lugar de fibras de celulosa en el diseño de las mezclas asfálticas SMA resultó en una notable reducción en el escurrimiento del asfalto. En el diseño óptimo con fibras de basalto, se registró un valor del 0.10%, en comparación con el 0.22% obtenido en el diseño óptimo con fibras de celulosa. Esta disminución representa una caída del 120.00% con respecto a la muestra estándar, según lo indicado en la Tabla 27 del estudio.

Con base a lo anteriormente expuesto, se concluye que las fibras de basalto se presentan como una alternativa óptima para reemplazar a las fibras convencionales de celulosa como estabilizadoras de la mezcla asfáltica SMA. En este estudio, se determinó que la mezcla asfáltica SMA con fibras de basalto alcanza su rendimiento óptimo con un porcentaje de fibras del 0.4% y un contenido de asfalto óptimo de 6.52%. En contraste, la mezcla asfáltica SMA con fibra de celulosa muestra su rendimiento óptimo con un porcentaje de fibras del 0.3% y un contenido de asfalto óptimo de 6.45%.

Recomendaciones

Se sugiere llevar a cabo la doble molienda de la arena chancada en la planta para incrementar la cantidad de finos que pasan por la malla N° 200. Esto asegura cumplir con las gradaciones de diseño establecidas para las mezclas asfálticas *stone mastic asphalt* según la especificación AASHTO.

Impulsar la adopción de mezclas asfálticas SMA en Perú, aprovechando sus beneficios. A diferencia de otros países latinoamericanos como México, Colombia y Chile, donde se utiliza comúnmente para pavimentar vías de alto tráfico.

Recomendar investigar el rendimiento in situ de las mezclas asfálticas SMA en el Perú, ya que hasta ahora no se ha implementado en ninguna carretera asfaltada en el país. A diferencia de otros países latinoamericanos como México, Colombia y Chile, donde es común usar este tipo de mezclas para vías de alto tráfico.

Recomendar investigaciones futuras sobre mezclas asfálticas SMA con diversas fibras estabilizadoras alternativas a las de celulosa. Dado que en el Perú hay variedad de materias primas (fibras minerales, naturales, etc.) sin industrializar, pero compatibles con la estabilización de mezclas asfálticas SMA.

CAPÍTULO V

IMPORTANCIA DE LA ESTABILIZACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS STONE MASTIC ASPHALT MEDIANTE INHIBIDORES DE DRENAJE COMO FIBRAS DE BASALTO

La estabilización de mezclas asfálticas, especialmente mediante el uso de inhibidores de drenaje como las fibras de basalto, desempeña un papel crucial en la ingeniería de pavimentos y carreteras (Cetin *et al.*, 2021). La importancia de esta práctica radica en su capacidad para mejorar significativamente la durabilidad, resistencia y vida útil de las superficies pavimentadas. Las fibras de basalto, al actuar como inhibidores de drenaje, introducen una dimensión adicional a la estabilidad de las mezclas *stone mastic asphalt* (SMA). Estas fibras, provenientes de un material naturalmente resistente como el basalto, se integran en las mezclas asfálticas para reforzar la estructura y prevenir la segregación, contribuyendo así a un pavimento más robusto y capaz de resistir las tensiones asociadas al tráfico vehicular y a las condiciones climáticas adversas.

A su vez, Guo *et al.* (2022) determinan que el comportamiento de las fibras de basalto en las mezclas asfálticas es clave para entender su impacto en la estabilidad. En este escenario, se contempla que tales fibras actúan como refuerzo estructural y, a su vez, mejora la capacidad de las mezclas SMA para resistir las cargas repetidas y reducir el agrietamiento por fatiga. Además, las fibras de basalto contribuyen a mantener la cohesión de la mezcla durante la compactación, evitando la segregación de los agregados y asegurando una dis-

tribución homogénea, factores esenciales para la estabilidad a largo plazo del pavimento.

Investigadores como Liang *et al.* (2020) propusieron que los avances tecnológicos en la estabilización de mezclas asfálticas SMA han experimentado un progreso significativo, destacando la introducción de nuevas fibras estabilizadoras como una innovación clave. Desde tales conocimientos, se comprende que estos avances permiten una monitorización más precisa y en tiempo real del comportamiento de las mezclas, así como la simulación virtual para ajustar y perfeccionar formulaciones, llevando a un diseño más personalizado y eficiente de pavimentos.

Asimismo, las mejoras potenciales en la estabilidad de la mezcla SMA mediante fibras de basalto se traducen en una infraestructura vial más resistente, duradera y capaz de adaptarse a las demandas cambiantes del entorno. La combinación de la resistencia natural del basalto con las propiedades mejoradas de las fibras proporciona soluciones efectivas para maximizar la vida útil de los pavimentos y minimizar la necesidad de intervenciones de mantenimiento, consolidando la importancia de la estabilización de mezclas asfálticas con inhibidores de drenaje como una práctica esencial en la ingeniería de carreteras moderna (Huang *et al.*, 2020).

Por ende, la estabilización de mezclas asfálticas SMA mediante inhibidores de drenaje como las fibras de basalto representa un avance significativo en la ingeniería de pavimentos, proporcionando soluciones efectivas para mejorar la resistencia, durabilidad y rendimiento de las superficies pavimentadas. El comportamiento de las fibras de basalto en las mezclas SMA, los avances tecnológicos en su estabilización y las mejoras potenciales que aportan destacan la importancia de esta práctica en la construcción de carreteras modernas. La combinación de la resistencia natural del basalto con las propiedades mejora-

das de las fibras no solo fortalece la estructura del pavimento, sino que también contribuye a la sostenibilidad y longevidad de la infraestructura vial. En este contexto, la implementación de fibras de basalto como inhibidores de drenaje se posiciona como una estrategia clave para enfrentar los desafíos de tráfico intenso y condiciones climáticas variables, garantizando la calidad y eficiencia de las carreteras a lo largo del tiempo.

5.1. Comportamiento de las fibras de basalto en mezclas asfálticas

Las fibras de basalto han demostrado tener un comportamiento excepcional en mezclas asfálticas, contribuyendo significativamente a mejorar diversas propiedades clave (Xie y Wang, 2023). Su incorporación en este contexto ha sido especialmente relevante en la formación de mezclas asfálticas modificadas con fibras (MAMF), donde desempeñan un papel crucial en la mejora de la resistencia y durabilidad de la superficie de la carretera.

Adicionalmente, Pei *et al.* (2021) puntualizan que las fibras de basalto tienen un impacto significativo en la resistencia a la segregación de la mezcla durante la fase de compactación. Por consiguiente, su presencia facilita una distribución homogénea, evitando la separación de agregados gruesos y finos. Este efecto beneficioso contribuye a mantener la uniformidad de la mezcla asfáltica, resultando en un pavimento más consistente y resistente. En conjunto, estos dos aspectos fundamentales del comportamiento de las fibras de basalto en mezclas asfálticas refuerzan la estabilidad estructural y funcional del pavimento, posicionándolo como una opción avanzada y sostenible en el ámbito de la construcción vial.

Además, Chai *et al.* (2020) destacan que el papel de las fibras de basalto en la prevención del agrietamiento por fatiga contribuye a mejorar la seguridad vial al reducir la formación de fisuras que podrían comprometer la superficie de

la carretera. Este beneficio se traduce en una mayor resistencia a las deformaciones plásticas y una mayor capacidad para soportar cargas repetidas, lo que resulta crucial en vías expuestas a condiciones de tráfico intenso. Al comprender lo expuesto por los autores, se determina que la incorporación de fibras de basalto no solo refuerza la durabilidad del pavimento, sino que también proporciona un rendimiento estructural sostenible, consolidando su posición como una solución avanzada y eficaz en la construcción de carreteras.

Incluso, Zhao *et al.* (2020) señalan que la contribución de las fibras de basalto a la mejora de la integridad estructural tiene beneficios notables en términos de durabilidad y resistencia. En este escenario, la capacidad de las fibras para reforzar la matriz asfáltica no solo previene el agrietamiento por fatiga, sino que también optimiza la cohesión de la mezcla, proporcionando una mayor estabilidad y resistencia al deslizamiento. Por consiguiente, al entenderse su trabajo sinérgico, se indica que estas propiedades hacen que las fibras de basalto sean una adición valiosa para lograr un rendimiento excepcional y duradero en pavimentos asfálticos.

Para Wu *et al.* (2020), se exterioriza que las fibras de basalto desempeñan un papel esencial en la resistencia a la segregación de la mezcla durante la fase de compactación en la producción de pavimentos asfálticos. Su presencia contribuye significativamente a la distribución homogénea de los componentes de la mezcla, evitando la segregación de los agregados gruesos y finos. Este aspecto es crucial para lograr un pavimento más uniforme y resistente, ya que la segregación puede conducir a variaciones en la composición de la mezcla y, en última instancia, a la pérdida de cohesión y resistencia en áreas específicas del pavimento. La capacidad de las fibras de basalto para mantener la integridad de la mezcla durante la compactación mejora la calidad general del pavimento, contribuyendo a su durabilidad y rendimiento a lo largo del tiempo.

Además de su impacto en la resistencia a la segregación, Wu *et al.* (2022c) destaca que las fibras de basalto también juegan un papel clave en la reducción de la susceptibilidad a la deformación plástica. Al reforzar la matriz asfáltica, estas fibras minimizan la tendencia de la mezcla a deformarse bajo cargas repetidas, proporcionando una mayor estabilidad y durabilidad al pavimento. Evaluando su trabajo conjunto, se sostiene que la combinación de resistencia a la segregación y reducción de la deformación plástica hace que las fibras de basalto sean una elección valiosa para mejorar el comportamiento de las mezclas asfálticas en diversas condiciones y aplicaciones.

En resumen, el comportamiento de las fibras de basalto en mezclas asfálticas emerge como un factor transformador para la ingeniería de pavimentos. Su capacidad para reforzar la estructura, mejorar la resistencia a la tracción, prevenir el agrietamiento por fatiga, reducir la susceptibilidad a la deformación plástica y garantizar una distribución uniforme durante la compactación destaca la versatilidad y eficacia de estas fibras. Al proporcionar soluciones efectivas a desafíos comunes en la construcción de carreteras, las fibras de basalto elevan el rendimiento de los pavimentos, y también contribuyen a la sostenibilidad y durabilidad de las infraestructuras viales. Su aplicación representa un avance significativo en el diseño de mezclas asfálticas, promoviendo la creación de pavimentos más resistentes y duraderos que cumplen con los estándares de calidad requeridos para enfrentar las demandas cambiantes del tráfico y las condiciones ambientales.

5.2. Avances tecnológicos en la estabilización de mezclas asfálticas SMA

En primer lugar, Selcuk *et al.* (2023) señalan que la investigación y aplicación de fibras estabilizadoras más avanzadas han sido un componente esencial de los avances tecnológicos en la estabilización de mezclas asfálticas SMA.

En este contexto, se detalla que la diversificación de las opciones de fibras, como fibras de basalto y otros materiales innovadores, ha permitido adaptar las mezclas a diversas condiciones y requisitos específicos de cada proyecto. Estos materiales, con propiedades mejoradas en términos de resistencia y durabilidad, han llevado a una mayor optimización del comportamiento de las mezclas asfálticas, proporcionando soluciones más eficaces y sostenibles.

En segundo lugar, las tecnologías de monitoreo y evaluación *in situ* han mejorado drásticamente la capacidad de los ingenieros para entender y ajustar las mezclas asfálticas durante y después de su aplicación. Herramientas como sensores de temperatura, dispositivos de medición de densidad y técnicas de evaluación no destructiva han permitido una supervisión más precisa y en tiempo real del comportamiento de las mezclas, facilitando ajustes inmediatos para garantizar un rendimiento óptimo. Estos avances tecnológicos han impulsado la calidad y la eficacia de las mezclas asfálticas SMA, contribuyendo a la construcción de carreteras más duraderas y resistentes (Wang *et al.*, 2020).

En paralelo, Tan *et al.* (2020) establecen que las mejoras en la tecnología de producción de mezclas asfálticas SMA han transformado los procesos fundamentales de diseño y fabricación. Asimismo, la integración de sistemas de dosificación y mezclado avanzados en plantas de asfalto ha sido instrumental para alcanzar una homogeneidad excepcional en las mezclas, garantizando una distribución uniforme de los agregados y fibras estabilizadoras. Estos avances tecnológicos no solo han facilitado la conformidad con las especificaciones de diseño, sino que además han elevado la cohesión y el rendimiento estructural de los pavimentos SMA, consolidando la posición de esta tecnología como una solución de vanguardia en el desarrollo de infraestructuras viales duraderas y eficientes.

Por otro lado, Song y Sun (2023) señalan que la incorporación de innovaciones en la evaluación del comportamiento de las mezclas asfálticas SMA ha

revolucionado la manera en que se comprende y ajusta su desempeño en condiciones reales de servicio. Desde estos conocimientos, se recalca que las técnicas de pruebas no destructivas han emergido como herramientas fundamentales, permitiendo la inspección detallada de las propiedades de las mezclas sin comprometer la integridad del pavimento. Además, esto incluye técnicas como el uso de radares de penetración del suelo (GPR) para evaluar la densidad y uniformidad de la mezcla, proporcionando datos valiosos sobre su estructura interna.

Zhang y Liu (2020) sostienen que la utilización de modelos computacionales ha sido esencial para el progreso en la estabilización de mezclas asfálticas SMA. Estos modelos permiten una simulación detallada del comportamiento de las mezclas en diversas condiciones, ofreciendo información crucial para el diseño y la optimización de pavimentos. En este escenario, se alcanza a comprender que la capacidad de simular virtualmente la respuesta de la mezcla ante factores como cargas, temperaturas y condiciones climáticas específicas ha llevado a un diseño más preciso y personalizado.

Desde los conocimientos de Rasekh *et al.* (2023), se describe que la integración de tecnologías de evaluación en tiempo real y simulación computacional ha mejorado significativamente la toma de decisiones en todas las etapas del proceso, desde la planificación inicial hasta el mantenimiento continuo de las carreteras pavimentadas con mezclas asfálticas SMA. Esto ha permitido a los ingenieros ajustar y perfeccionar las formulaciones de las mezclas de manera más eficiente, garantizando un rendimiento óptimo y una mayor durabilidad en diversas situaciones y entornos.

En conjunto, los avances tecnológicos en la estabilización de mezclas asfálticas SMA han marcado un hito significativo en el desarrollo de pavimentos duraderos y eficientes. La combinación de técnicas avanzadas de evaluación, como pruebas no destructivas y modelado computacional, ha permitido una

comprensión más profunda y precisa del comportamiento de estas mezclas en condiciones reales. Estas herramientas no solo han optimizado el diseño inicial de las mezclas, sino que también han facilitado la monitorización continua durante el servicio, asegurando un rendimiento óptimo a lo largo del tiempo. Con estos avances, se abre un horizonte prometedor para el futuro de las infraestructuras viales, donde la tecnología desempeña un papel clave en la búsqueda constante de pavimentos más resistentes, seguros y sostenibles.

5.3. Mejoras potenciales en la estabilidad de la mezcla SMA mediante fibras de basalto

Las fibras de basalto se han destacado como un componente esencial para potenciar la estabilidad de las mezclas SMA, ya que aportan una serie de mejoras que influyen positivamente en el rendimiento y la durabilidad de los pavimentos (Li *et al.*, 2023). Principalmente, estas fibras desempeñan un papel fundamental como refuerzo estructural, ofreciendo resistencia adicional a la tracción en la mezcla asfáltica. Este refuerzo se revela crucial para prevenir el agrietamiento por fatiga, un fenómeno común en superficies expuestas a cargas repetidas y condiciones de tráfico intenso.

Incluso, Gu *et al.* (2022) revelan que las fibras de basalto contribuyen significativamente a la resistencia a la segregación durante la fase de compactación. Su distribución uniforme en la mezcla favorece la cohesión, evitando la separación de los agregados gruesos y finos. Este efecto asegura un pavimento más homogéneo y resistente, disminuyendo los riesgos asociados con la segregación. En este sentido, estas mejoras evidencian el papel clave de las fibras de basalto en la optimización de la estabilidad de las mezclas SMA, consolidándolas como una solución avanzada y sostenible para la construcción de pavimentos duraderos frente a las exigencias del tráfico y condiciones ambientales adversas.

Además de su papel como refuerzo estructural, Zhu *et al.* (2023) sostienen que las fibras de basalto desempeñan un papel crucial en el fortalecimiento de la integridad estructural del pavimento. En este sentido, se resalta que su capacidad para minimizar la propagación de grietas existentes constituye un aspecto esencial para prolongar la vida útil del pavimento y reducir la necesidad de intervenciones de mantenimiento. En concordancia con ello, se estima que, al actuar en conjunto, estas fibras trabajan para redistribuir las tensiones dentro de la mezcla asfáltica, contribuyendo a una mayor resistencia contra el agrietamiento y proporcionando un pavimento más duradero y resistente a lo largo del tiempo. Este impacto positivo en la gestión de grietas existentes subraya la importancia de las fibras de basalto como elemento clave en la mejora integral de la estabilidad y la durabilidad de las mezclas SMA.

Por consiguiente, Liu *et al.* (2023) determinan que se comprende que la estabilidad de la mezcla SMA sin fibras de basalto puede verse afectada en comparación con aquellas que incorporan este componente crucial. Asimismo, la estabilidad en las mezclas SMA sin fibras puede presentar desafíos relacionados con la resistencia a la tracción y la capacidad para soportar cargas repetidas. También estas mezclas, al carecer del refuerzo estructural proporcionado por las fibras de basalto, pueden ser más propensas al agrietamiento por fatiga, un fenómeno común en pavimentos expuestos a condiciones de tráfico intensas.

Además, Xing *et al.* (2020) establecen que la ausencia de fibras de basalto podría influir en la propagación de grietas, lo que podría resultar en una menor integridad estructural y una vida útil reducida del pavimento. Respecto de ello, se sostiene que la estabilidad de las mezclas SMA sin fibras puede verse comprometida en términos de resistencia y durabilidad, lo que resalta la importancia de considerar la incorporación de fibras de basalto como una estrategia efectiva para mejorar y mantener la estabilidad de estas mezclas asfálticas en aplicaciones viales.

En conclusión, la integración de fibras de basalto en las mezclas SMA representa una innovación significativa para mejorar la estabilidad y el rendimiento de los pavimentos. Estas fibras actúan como un refuerzo estructural esencial, proporcionando resistencia adicional a la tracción y minimizando la propagación de grietas, lo que contribuye a prevenir el agrietamiento por fatiga y prolonga la vida útil del pavimento. Los beneficios potenciales de estas mejoras no solo se traducen en una mayor durabilidad de las superficies viales, sino también en una reducción de la necesidad de intervenciones de mantenimiento, lo que resulta en una infraestructura más sostenible y resistente a las demandas del tráfico y las condiciones ambientales. La incorporación de fibras de basalto emerge entonces como una estrategia integral para elevar la calidad y la estabilidad de las mezclas SMA, consolidándose como un elemento clave en la evolución y mejora continua de las tecnologías de pavimentación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Al-Kharabsheh, B. N., Arbili, M. M., Majdi, A., Alogla, S. M., Hakamy, A., Ahmad, J., y Deifalla, A. F. (2022). Basalt fibers reinforced concrete: Strength and failure modes. *Materials*, 15(20), 7350. <https://doi.org/10.3390/ma15207350>

Al-Kharabsheh, B. N., Arbili, M. M., Majdi, A., Alogla, S. M., Hakamy, A., Ahmad, J., y Deifalla, A. F. (2023). Basalt fiber reinforced concrete: a compressive review on durability aspects. *Materials*, 16(1), 429. <https://doi.org/10.3390/ma16010429>

Al-Kheetan, M. J., Azim, T., Byzyka, J., Ghaffar, S. H., y Rahman, M. M. (2022). Performance of magnetite-based stone mastic asphalt (SMA) as a superior surface course material. *Construction and Building Materials*, 322, 126463. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126463>

Babalghaith, A. M., Koting, S., Sulong, N. H. R., Karim, M. R., y AlMashjary, B. M. (2020). Performance evaluation of stone mastic asphalt (SMA) mixtures with palm oil clinker (POC) as fine aggregate replacement. *Construction and building materials*, 262, 120546. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120546>

Bhat, F. S., y Mir, M. S. (2022). Study Investigating the Influence of Warm-Mix Asphalt Additives on Rutting and Fatigue Performance of Nano-Modified Asphalt Binders. *Transportation Research Record*, 2676(4), 719-731. <https://doi.org/10.1177/03611981211064995>

Castro, H. R., Romero, B. R., Vásquez, C. A., y Arriola, G. G. (2020). Influencia de la cáscara y fibra de coco en mezclas asfálticas en caliente. *Ingeniería: Ciencia, Tecnología Innovación*, 7(2). <https://doi.org/10.26495/icti.v7i2.1506>

Cetin, A., Evirgen, B., Karslioglu, A., y Tuncan, A. (2021). The effect of basalt fiber on the performance of stone mastic asphalt. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 65(1), 299-308. <https://doi.org/10.3311/PPci.14190>

Chai, C., Cheng, Y., Zhang, Y., Zhu, B., y Liu, H. (2020). Mechanical properties of crumb rubber and basalt fiber composite modified porous asphalt concrete with steel slag as aggregate. *Polymers*, 12(11), 2552. <https://doi.org/10.3390/polym12112552>

Chegenizadeh, A., Peters, B., y Nikraz, H. (2021a). Mechanical properties of stone mastic asphalt containing high-density polyethylene: An Australian case. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00631. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00631>

Chegenizadeh, A., Tokoni, L., Nikraz, H., y Dadras, E. (2021b). Effect of ethylene-vinyl acetate (EVA) on stone mastic asphalt (SMA) behaviour. *Construction and Building Materials*, 272, 121628. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121628>

Chen, L., Li, W., Chen, M., Qian, Z., Chen, X., y Zheng, Z. (2023c). Bleeding mechanism and mitigation technique of basalt fiber-reinforced asphalt mixture. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02442. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02442>

Chen, W., Han, C., Liu, Y., Feng, K., & Zhuang, S. (2023b). Experimental Investigation of Cumulative Damage and Self-Healing Properties of Smart Cementitious Composite under Continuous Compression Load. *Materials*, 16(18), 6090. <https://doi.org/10.3390/ma16186090>

Chen, W., Han, C., Xie, Y., Lin, B., & Cui, S. (2023a). Evaluation of compression self-healing performance of a smart cementitious composite SMA-ECC. *Construction and Building Materials*, 409, 133917. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133917>

Chen, W., Lin, B., Feng, K., Cui, S., y Zhang, D. (2022). Effect of shape memory alloy fiber content and preloading level on the self-healing properties of smart cementitious composite (SMA-ECC). *Construction and Building Materials*, 341, 127797. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127797>

Chen, W., Wei, J., Xu, X., Zhang, X., Han, W., Yan, X., Hu, G., y Lu, Z. (2021a). Study on the optimum steel slag content of sma-13 asphalt mixes based on road performance. *Coatings*, 11(12), 1436. <https://doi.org/10.3390/coatings11121436>

Chen, Z., Chen, Z., Yi, J., y Feng, D. (2021b). Application of corn stalk fibers in SMA mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(7), 04021147. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003762](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003762)

Cheng, Y. (2013). Laboratory research of optimum fiber content in SMA mixture based on high temperature performance. *Applied Mechanics and Materials*, 361-363, 1709. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.361-363.1709>

Cheng, Y., Li, H., Wang, W., Li, L., y Wang, H. (2020). Laboratory evaluation on the performance degradation of styrene-butadiene-styrene-modified asphalt mixture reinforced with basalt fiber under freeze-thaw cycles. *Polymers*, 12(5), 1092. <https://doi.org/10.3390/polym12051092>

Choi, E., Choi, J., y Seo, J. (2022). Recovery stress effect of crimped NiTi SMA fibers on dynamic direct tensile behavior of mortar with considering fiber volume fraction. *Engineering Structures*, 262, 114328. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114328>

Çevrim, K., e Iskender, E. (2023). Investigation of the usability of aggregates produced from sea shell in SMA pavements with different addition methods. *Road Materials and Pavement Design*, 24(8), 2090-2103. <https://doi.org/10.1080/14680629.2022.2111337>

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 maestría, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio Institucional Universidad Ricardo Palma. <https://hdl.handle.net/20.500.14138/2507>

Delbono, H., y Gullino, N. (2020). Ensayo a fatiga, implementando la Semi probeta (SCB), sobre mezclas asfálticas con diferentes modificadores del cemento asfáltico. *Ingenio Tecnológico*, 2. <http://portal.amelica.org/ameli/journal/266/2661113010/html/>

Dias, A., Silva, H., Palha, C., y Oliveira, J. (2021). Low-temperature performance of polymer-modified binders in stone mastic asphalts. *Infrastructures*, 6(4), 58. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6040058>

Dong, G., Zheng, N., y Qie, L. (2012). Research on influence of different fibers on pavement performance of SMA. *Applied Mechanics and Materials*, 253-255, 599. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.253-255.599>

Elganidi, I., Elarbe, B., Ridzuan, N., y Abdullah, N. (2022). Optimisation of reaction parameters for a novel polymeric additives as flow improvers of crude oil using response surface methodology. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 12, 437-449. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13202-021-01349-1>

Eren, Ç., Özen, H., Şahin, O., y Aygörmez, Y. (2023). Measurement of the Performances of Various Asphalt Mixtures on Suspended Steel Deck Bridge Pavements. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 1-17. <https://link.springer.com/article/10.1007/s42947-023-00378-9>

Evirgen, B., Cetin, A., Karslioğlu, A., y Tuncan, A. (2021). An evaluation of the usability of glass and polypropylene fibers in SMA mixtures. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 318-328. <https://dergipark.org.tr/en/pub/pajes/issue/62735/947962>

Flores, P. M., Gatica, A., Trinidad, D., y Sulca, V. (2022). Uso de Grano de Caucho Reciclado para mejorar la resistencia y durabilidad en pavimentos: una revisión literaria. *Investigatio*, (18). <https://doi.org/10.31095/investigatio.2022.18.2>

Frete, N. (2020). Primeros estudios sobre los RAP derivados de mezclas con asfaltos modificados (RMAP), en la elaboración de nuevas mezclas en caliente. *Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN*. <https://doi.org/10.33414/ajea.5.645.2020>

Gardziejczyk, W., Plewa, A., y Pakholak, R. (2020) Effect of Addition of Rubber Granulate and Type of Modified Binder on the Viscoelastic Properties of stone mastic asphalt Reducing Tire/Road Noise (SMA LA). *Materials*, 13(16), 3446. <https://doi.org/10.3390/ma13163446>

Gu, Q., Kang, A., Li, B., Xiao, P., y Ding, H. (2022). Effect of fiber characteristic parameters on the high and low temperature rheological properties of basalt fiber modified asphalt mortar. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01247. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01247>

Gu, Y., Ding, C., Shen, J., y Wang, W. (2022). Low Temperature Crack Resistance of stone mastic asphalt Affected by Its Nominal Maximum Size and Asphalt Binders. *Applied Sciences*, 12(15), 7444. <https://doi.org/10.3390/app12157444>

Guan, B., Xiong, R., He, R., Chen, S., y Ding, D. (2014). Investigation of usability of brucite fiber in asphalt mixture. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 7(3), 193-202. <https://search.proquest.com/docview/1534252192?accountid=45097>

Guo, S., Cheng, P., Yi, J., y Chang, L. (2022). Performance Evaluation of SMA Mixture Reinforced by Basalt Fiber and Composite Fiber. En *CICTP 2022* (pp. 2232-2241). <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784484265.209>

Ho, H. V., Choi, E., y Park, S. J. (2021). Investigating stress distribution of crimped SMA fibers during pullout behavior using experimental testing and a finite element model. *Composite Structures*, 272, 114254. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114254>

Hoyos, L., Puicon, K., y Munoz, S. (2021). Uso del caucho granulado en mezclas asfálticas: Una revisión literaria. *Infraestructura Vial, San Pedro de Montes de Oca*, 23(41), 11-19. <http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2215-37052021000100011&lng=en&nrm=iso>

Huang, Y., Liu, Z., Liu, L., Zhang, Y., y Xu, Q. (2020). Hybrid modification of stone mastic asphalt with cellulose and basalt fiber. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2020/5671256>

Hui, Y., Men, G., Xiao, P., Tang, Q., Han, F., Kang, A., y Wu, Z. (2022). Recent advances in basalt fiber reinforced asphalt mixture for pavement applications. *Materials*, 15(19), 6826. <https://doi.org/10.3390/ma15196826>

Jamieson, S., y White, G. (2020). Review of stone mastic asphalt as a high-performance ungrooved runway surfacing. *Road Materials and Pavement Design*, 21(4), 886-905. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1545688>

Jamieson, S., & White, G. (2021). Laboratory Evaluation of the Performance of stone mastic asphalt as an Ungrooved Runway Surface. *Materials*, 14(3), 502. <https://doi.org/10.3390/ma14030502>

Jaramillo, C., Bastidas, J., Lizcano, O., Ramos, D. (2021, 29 de septiembre-1 de octubre). *Study of a hot-mix Asphalt with rice husk ash*. 2021 Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería (CONIITI), Bogotá, Colombia. <https://doi.org/10.1109/CONIITI53815.2021.9619710>

Jasni, N., Masri, K., Ramadhansyah, P., Arshad, A., Shaffie, E., Ahmad, J., y Norhidayah, A. (2020). Mechanical performance of *stone mastic asphalt* incorporating steel fiber. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 712, 012026. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/712/1/012026>

Jiang, Y., Zhang, Y., Xue, J., Deng, C., y Tian, T. (2020). Performance of stone mastic asphalt mixtures fabricated by different compaction methods. *Applied Sciences*, 10(7), 2523. <https://doi.org/10.3390/app10072523>

Jiu, X., Wang, Y., Wu, Z., Xiao, P., y Kang, A. (2023). High-Temperature Performance Evaluation of Asphalt Mixtures by Adding Short-Chopped Basalt Fiber. *Buildings*, 13(2), 370. <https://doi.org/10.3390/buildings13020370>

Jung, C., y Lee, J. H. (2020). Crack closure and flexural tensile capacity with SMA fibers randomly embedded on tensile side of mortar beams. *Nanotechnology Reviews*, 9(1), 354-366. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2020-0026>

Katla, B., Ravindra, W. A., Kota, S. K., y Raju, S. (2021). RAP-added SMA mixtures: How do they fare? *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(8), 04021199. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003807](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003807)

Kim, D., Menches, C., Kim, D., Kweon, T., y Huh, Y. (2014). Comparative simulation analysis of pavement technology for a decision support system in the U.S. road renewal industry. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(4), 920-926. <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-014-0257-0>

Kou, C., Wu, X., Kang, A., Xiao, P., y Wu, Z. (2022). Performance Evaluation of Hot Mix Asphalt Reinforced by Basalt Fibers with Various Diameters. *Journal of Testing and Evaluation*, 50(4), 1920-1933. <https://doi.org/10.1520/JTE20210431>

Kou, C., Wu, X., Xiao, P., Liu, Y., y Wu, Z. (2020). Physical, rheological, and morphological properties of asphalt reinforced by basalt fiber and lignin fiber. *Materials*, 13(11), 2520. <https://doi.org/10.3390/ma13112520>

Kumar, T., Ramesh, A., y Kumar, M. (2016). Evaluation of rutting characteristics in stone mastic asphalt mix when added with basalt fiber. *I-Manager's Journal on Material Science*, 4(3), 19-16. <https://search.proquest.com/docview/1862113760?accountid=45097>

Li, B., Liu, M., Kang, A., Zhang, Y., y Zheng, Z. (2023). Effect of Basalt Fiber Diameter on the Properties of Asphalt Mastic and Asphalt Mixture. *Materials*, 16(20), 6711. <https://doi.org/10.3390/ma16206711>

Li, N., Zhan, H., Yu, X., Tang, W., y Xue, Q. (2021). Investigation of the aging behavior of cellulose fiber in reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 271, 121559. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121559>

Liang, C., Ma, J., Zhou, P., Ma, G., y Xu, X. (2020). Fracture damage properties of SBS-modified asphalt mixtures reinforced with basalt fiber after freeze-thaw cycles using the acoustic emission approach. *Applied Sciences*, 10(9), 3301. <https://doi.org/10.3390/app10093301>

Liu, Z., Su, B., Zhang, L., Li, Z., Wang, C., Wu, Z., Wu, S., Wu, H., Geng, P., Chen, S., Liu, G., Yang, L., Xia, Z., Yan, C., y Shi, Y. (2023). Continuous basalt fibers into fireproof and thermal insulation architectures using an additive manufacturing manipulator. *Materials & Design*, 235, 112434. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112434>

Lou, K., Wu, X., Xiao, P., Kang, A., Wu, Z., y Xia, Y. (2021a). Comprehensive study about effect of basalt fiber, gradation, nominal maximum aggregate size and asphalt on the anti-cracking ability of asphalt mixtures. *Applied Sciences*, 11(5), 2289. <https://doi.org/10.3390/app11052289>

Lou, K., Wu, X., Xiao, P., y Zhang, C. (2021b). Investigation on fatigue performance of asphalt mixture reinforced by basalt fiber. *Materials*, 14(19), 5596. <https://doi.org/10.3390/ma14195596>

Lou, K., Xiao, P., Wu, B., Kang, A., Wu, X., y Shen, Q. (2021c). Effects of fiber length and content on the performance of ultra-thin wearing course modified by basalt fibers. *Construction and Building Materials*, 313, 125439. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125439>

Mendonça, A., Melo, O., Rodrigues, J., Lima, R., Silva, I., Sousa, V., Carvalho, F., Coutinho, Y., Da Silva, A., y Guerra, T. (2021). Effect of the incorporation of sugarcane bagasse fibers in asphalt mixture dosed by the Superpave method. *Research, Society and Development*, 10(13), e80101320878, <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i13.20878>.

Morea, F., Nosetti, R., Gonzalez, L., y Sánchez, A. (2023). Performance analysis of non-conventional Stone Mastic asphalt (SMA) elaborated with crumb rubber bitumen or by mean of glass macrofibers addition. *Construction and Building Materials*, 400, 132654. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132654>

Noura, S., Al-Sabaei, A. M., Safaeldeen, G. I., Muniandy, R., y Carter, A. (2021). Evaluation of measured and predicted resilient modulus of rubberized stone mastic asphalt (SMA) modified with truck tire rubber powder. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00633. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00633>

Oner, J. (2023). Evaluation of mechanical properties for stone mastic asphalt containing textile waste. *Revista Materia*, 28(2), e20230092. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0092>

Pei, Z., Lou, K., Kong, H., Wu, B., Wu, X., Xiao, P., y Qi, Y. (2021). Effects of fiber diameter on crack resistance of asphalt mixtures reinforced by basalt fibers based on digital image correlation technology. *Materials*, 14(23), 7426. <https://doi.org/10.3390/ma14237426>

Rasekh, M., Haldenbilen, S., y Zengin, D. (2023). Investigation of usability of mineral fiber in stone mastic asphalt. *Revista de la Construcción*, 22(3), 569-580. <https://dx.doi.org/10.7764/rdlc.22.3.569>

Selcuk, S., Ahmetoglu, U., y Gokce, E. C. (2023). Basalt fiber reinforced polymer composites (BFRP) other than rebars: a review. *Materials Today Communications*, 107359. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107359>

Selsal, Z., Karakas, A. S., y Sayin, B. (2022). Effect of pavement thickness on stress distribution in asphalt pavements under traffic loads. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01107. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01107>

Sheng, Y., Li, H., Guo, P., Zhao, G., Chen, H., y Xiong, R. (2017). Effect of fibers on mixture design of stone matrix asphalt. *Applied Sciences*, 7(3), 297. <http://dx.doi.org/10.3390/app7030297>

Singh, N., Agarwal, P., Porwal, J., y Porwal, S. K. (2023). Evaluation of block copolymer and homopolymer of stearyl methacrylate as multifunctional additives for lubricating oil. *Polymer Bulletin*, 1-17. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00289-023-04937-9>

Song, Y., y Sun, Y. (2023). Low-Temperature Crack Resistance of Basalt Fiber-Reinforced Phase-Change Asphalt Mixture Based on Digital-Image Correlation Technology. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(6), 04023141. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-15265>

Tan, G., Wang, W., Cheng, Y., Wang, Y., y Zhu, Z. (2020). Establishment of complex modulus master curves based on generalized sigmoidal model for freeze-thaw resistance evaluation of basalt fiber-modified asphalt mixtures. *Polymers*, 12(8), 1698. <https://doi.org/10.3390/polym12081698>

Torres, A., y Cedeño, M. (2024). Implementación de metodología de evaluación por desempeño para mezclas asfálticas en Panamá. *I+D Tecnológico*, 20(1), 27-38. <https://doi.org/10.33412/idt.v20.1.3865>

Wang, W., Tan, G., Liang, C., Wang, Y., y Cheng, Y. (2020). Study on viscoelastic properties of asphalt mixtures incorporating SBS polymer and basalt fiber under freeze-thaw cycles. *Polymers*, 12(8), 1804. <https://doi.org/10.3390/polym12081804>

Wang, W., Yang, L., Cui, H., Wu, F., Cheng, Y., y Liang, C. (2023). Freeze-Thaw Damage Mechanism Analysis of SBS Asphalt Mixture Containing Basalt Fiber and Lignocellulosic Fiber Based on Microscopic Void Characteristics. *Polymers*, 15(19), 3887. <https://doi.org/10.3390/polym15193887>

Wu, B., Meng, W., Xia, J., y Xiao, P. (2022a). Influence of basalt fibers on the crack resistance of asphalt mixtures and mechanism analysis. *Materials*, 15(3), 744. <https://doi.org/10.3390/ma15030744>

Wu, B., Pei, Z., Luo, C., Xia, J., Chen, C., & Kang, A. (2022b). Effect of different basalt fibers on the rheological behavior of asphalt mastic. *Construction and Building Materials*, 318, 125718. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125718>

Wu, B., Pei, Z., Xiao, P., y Lou, K. (2022c). Evaluation of the Interfacial Interaction Ability between Basalt Fibers and the Asphalt Mastic. *Materials*, 15(22), 8209. <https://doi.org/10.3390/ma15228209>

Wu, B., Wu, X., Xiao, P., Chen, C., Xia, J., y Lou, K. (2021). Evaluation of the long-term performances of SMA-13 containing different fibers. *Applied Sciences*, 11(11), 5145. <https://doi.org/10.3390/app11115145>

Wu, S., Haji, A., y Adkins, I. (2023). State of art review on the incorporation of fibres in asphalt pavements. *Road Materials and Pavement Design*, 24(6), 1559-1594. <https://doi.org/10.1080/14680629.2022.2092022>

Wu, Z., Zhang, C., Xiao, P., Li, B., y Kang, A. (2020). Performance characterization of hot mix asphalt with high RAP content and basalt fiber. *Materials*, 13(14), 3145. <https://doi.org/10.3390/ma13143145>

Xie, T., y Wang, L. (2023). Optimize the design by evaluating the performance of asphalt mastic reinforced with different basalt fiber lengths and contents. *Construction and Building Materials*, 363, 129698. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129698>

Xing, X., Chen, S., Li, Y., Pei, J., Zhang, J., Wen, Y., Li, R., y Cui, S. (2020). Effect of different fibers on the properties of asphalt mastics. *Construction and Building Materials*, 262, 120005. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120005>

Xu, Z., Zhou, H., Chen, T., Zhang, H., y Wang, H. (2022, 22 de diciembre). *Study on the pavement performance test of SMA-13 bituminous mixture containing basalt fibers*. International Conference on Smart Transportation and City Engineering (STCE 2022), Chongqing, China. <https://doi.org/10.1117/12.2658318>

Yan, L., Chu, F., Tuo, W., Zhao, X., Wang, Y., Zhang, P., y Gao, Y. (2021). Review of research on basalt fibers and basalt fiber-reinforced composites in China (I): Physicochemical and mechanical properties. *Polymers and Polymer Composites*, 29(9), 1612-1624. <https://doi.org/10.1177/0967391120977396>

Yang, Z., Deng, T., y Fu, Q. (2023). The Effect of Fiber End on the Bonding Mechanical Properties between SMA Fibers and ECC Matrix. *Buildings*, 13(8), 2027. <https://doi.org/10.3390/buildings13082027>

Zhang, X., y Liu, J. (2020). Viscoelastic creep properties and mesostructure modeling of basalt fiber-reinforced asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 259, 119680. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119680>

Zhao, H., Guan, B., Xiong, R., y Zhang, A. (2020). Investigation of the performance of basalt fiber reinforced asphalt mixture. *Applied Sciences*, 10(5), 1561. <https://doi.org/10.3390/app10051561>

Zheng, Y., Cai, Y., Zhang, G., y Fang, H. (2014). Fatigue property of basalt fiber-modified asphalt mixture under complicated environment. *Journal of Wuhan University of Technology*, 29(5), 996-1004. <http://dx.doi.org/10.1007/s11595-014-1033-1>

Zhou, J., Dong, Z., Wang, T., Cao, C., Sun, J., Tian, S., y Luo, M. (2023). A novel design method for stone mastic asphalt (SMA) for airports in cold regions. *Mater Struct*, 56(97). <https://doi.org/10.1617/s11527-023-02188-8>

Zhu, Z., Xiao, P., Kang, A., Wu, Z., Kou, C., y Ren, Z. (2023). Research on the road performance of self-adhesive basalt fiber geotextiles based on the background of long-life pavements. *Construction and Building Materials*, 392, 131776. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131776>

SOBRE LOS AUTORES

Hirbin Félix Céspedes Reynaga

Correo: hcespedes@pucp.edu.pe

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6895-7608>

Edwin De La Cruz Alanya

Correo: ingcivileda@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0304-4011>

Vitaly Uriel Céspedes Reynaga

Correo: vcspedes@pucp.edu.pe

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7422-7393>

Delmer Huayra Romani

Afiliación: Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo

Correo: delmer.huayra@unat.edu.pe

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0763-9985>

ESTABILIZACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS STONE MASTIC ASPHALT (SMA) MEDIANTE INHIBIDORES DE DRENAJE COMO FIBRAS DE BASALTO

www.arcoeditores.com
contato@arcoeditores.com
(55)99723-4952