



**UNIVERSIDAD LAICA “ELOY ALFARO” DE MANABÍ**

**Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura**

**Carrera de Ingeniería Civil**

**Trabajo de titulación**

**Modalidad:** Proyecto de investigación

**“ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA FIBRA DE PSEUDOTALLO DE PLÁTANO EN LOS  
PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS Y DE RESISTENCIA MARSHALL DE UNA MEZCLA  
ASFÁLTICA PARA CAPA DE RODADURA”**

**Autores:**


Alvia Fiallos Bryan Ricardo  
Zambrano Zambrano Michel Antonio

**Tutor:**

Ing. Jorge Eduardo García Argandoña, MSc.

Manta – Ecuador

2025 - 2

 <b>Uleam</b> <small>UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ</small>	<b>NOMBRE DEL DOCUMENTO:</b> CERTIFICADO DE TUTOR(A).	<b>CÓDIGO:</b> PAT-04-F-004
	<b>PROCEDIMIENTO:</b> TITULACIÓN DE ESTUDIANTES DE GRADO BAJO LA UNIDAD DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	<b>REVISIÓN:</b> 1 Página 1 de 1

## CERTIFICACIÓN

En calidad de docente tutor de la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura de Manta de la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, CERTIFICO:


Haber dirigido, revisado y aprobado preliminarmente el Trabajo de Integración Curricular bajo la autoría del estudiante Alvia Fiallos Bryan Ricardo, legalmente matriculado en la carrera de Ingeniería Civil, período académico 2025 2026, cumpliendo el total de 384 horas, cuyo tema del proyecto es "ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA FIBRA DE PSEUDOTALLO DE PLÁTANO EN LOS PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS Y DE RESISTENCIA MARSHALL DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA PARA CAPA DE RODADURA".


La presente investigación ha sido desarrollada en apego al cumplimiento de los requisitos académicos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico y en concordancia con los lineamientos internos de la opción de titulación en mención, reuniendo y cumpliendo con los méritos académicos, científicos y formales, y la originalidad del mismo, requisitos suficientes para ser sometida a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Manta, 12 de febrero de 2026.

Lo certifico,

  
Ing. Jorge Eduardo García Argandoña. Mg.  
**Docente Tutor**  
**Área: Vialidad.**

	NOMBRE DEL DOCUMENTO: CERTIFICADO DE TUTOR(A).	CÓDIGO: PAT-04-F-004
	PROCEDIMIENTO: TITULACIÓN DE ESTUDIANTES DE GRADO BAJO LA UNIDAD DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	REVISIÓN: 1 Página 1 de 1

## CERTIFICACIÓN

En calidad de docente tutor de la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura de Manta de la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, CERTIFICO:


Haber dirigido, revisado y aprobado preliminarmente el Trabajo de Integración Curricular bajo la autoría del estudiante Zambrano Zambrano Michel Antonio, legalmente matriculado en la carrera de Ingeniería Civil, período académico 2025 2026, cumpliendo el total de 384 horas, cuyo tema del proyecto es "ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA FIBRA DE PSEUDOTALLO DE PLÁTANO EN LOS PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS Y DE RESISTENCIA MARSHALL DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA PARA CAPA DE RODADURA".

La presente investigación ha sido desarrollada en apego al cumplimiento de los requisitos académicos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico y en concordancia con los lineamientos internos de la opción de titulación en mención, reuniendo y cumpliendo con los méritos académicos, científicos y formales, y la originalidad del mismo, requisitos suficientes para ser sometida a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Manta, 12 de febrero de 2026.

Lo certifico,

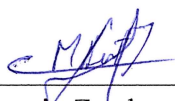
  
Ing. Jorge Eduardo García Argandoña. Mg.  
**Docente Tutor**  
**Área: Vialidad.**

## DECLARACIÓN DE AUTORIA

Yo, **MICHEL ANTONIO ZAMBRANO ZAMBRANO** con CC: 131504666-2, doy constancia de ser el autor del Trabajo de Titulación con modalidad Proyecto de investigación con el tema "**ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA FIBRA DE PSEUDOTALLO DE PLÁTANO EN LOS PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS Y DE RESISTENCIA MARSHALL DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA PARA CAPA DE RODADURA**", el cual fue dirigido por el tutor, **Ing. Jorge Eduardo García Argandoña, Mg.**

Quiero resaltar la originalidad de este trabajo, que se fundamenta en la contribución de varios autores que enriquecieron la investigación, así como en la recopilación de datos e información provenientes de fuentes bibliográficas, visitas de campo, entre otros recursos.

En la ciudad de Manta, a los 30 días del mes de enero de dos mil veinte y seis.



---

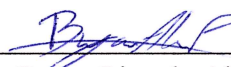
Michel Antonio Zambrano Zambrano  
CI: 131504666-2  
Autor

## DECLARACIÓN DE AUTORIA

Yo, **BRYAN RICARDO ALVIA FIALLOS** con CC: 131686828-8, doy constancia de ser el autor del Trabajo de Titulación con modalidad Proyecto de investigación con el tema **"ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA FIBRA DE PSEUDOTALLO DE PLÁTANO EN LOS PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS Y DE RESISTENCIA MARSHALL DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA PARA CAPA DE RODADURA "**, el cual fue dirigido por el tutor, **Ing. Jorge Eduardo García Argandoña, Mg.**

Quiero resaltar la originalidad de este trabajo, que se fundamenta en la contribución de varios autores que enriquecieron la investigación, así como en la recopilación de datos e información provenientes de fuentes bibliográficas, visitas de campo, entre otros recursos.

En la ciudad de Manta, a los 30 días del mes de enero de dos mil veinte y seis.



---

Bryan Ricardo Alvia Fiallos

CI: 131686828-8

Autor

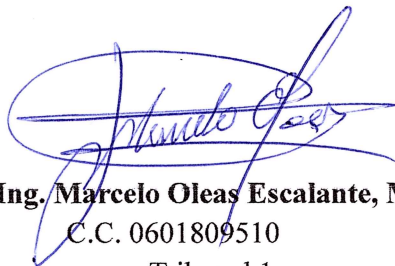
## CERTIFICACIÓN DE APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

En calidad de tribunales de la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura de la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, certifico:

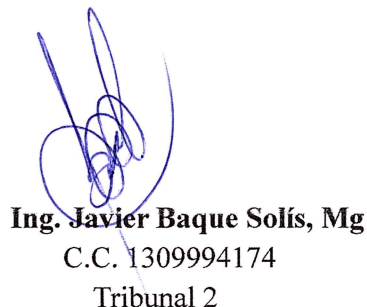
Haber revisado el trabajo de titulación, bajo la modalidad de **Proyecto de Investigación**, cuyo tema es "ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA FIBRA DE PSEUDOTALLO DE PLÁTANO EN LOS PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS Y DE RESISTENCIA MARSHALL DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA PARA CAPA DE RODADURA" de la modalidad en mención y en apego al cumplimiento de los requisitos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico, por tal motivo APRUEBO, que el mencionado proyecto reúne los méritos académicos, científicos y formales, suficientes para proceder a la defensa correspondiente.

Certifico lo anterior para los fines pertinentes, a salvo disposición de Ley en contrario.

En la ciudad de *Manta*, a los 23 días del mes de febrero de dos mil veinte y seis.



**Ing. Marcelo Oleas Escalante, Mg.**  
C.C. 0601809510  
Tribunal 1



**Ing. Javier Baque Solís, Mg**  
C.C. 1309994174  
Tribunal 2

## **DEDICATORIA**

Dedicamos el presente trabajo a nuestras familias, por su apoyo incondicional, paciencia y motivación constante a lo largo de nuestra formación académica. Gracias por acompañarnos en cada etapa, por comprender los sacrificios que implicó este proceso y por brindarnos la fortaleza necesaria para continuar incluso en los momentos más exigentes. Su confianza, sus palabras de aliento y su respaldo permanente fueron esenciales para culminar esta investigación y alcanzar esta meta profesional.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, a la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura y a la Carrera de Ingeniería Civil por la formación académica brindada durante nuestra etapa universitaria.

De manera especial, expresamos nuestro sincero agradecimiento al Ing. Jorge Eduardo García Argandoña, MSc, por su orientación técnica, acompañamiento constante y observaciones oportunas, fundamentales para el desarrollo y culminación de esta investigación.

Agradecemos también a la empresa Decasvial, en particular al Téc. de Calidad Jean Paolo Mendoza Vera, por facilitar equipos, laboratorio, información y acceso, así como por el apoyo logístico brindado durante la ejecución del estudio.

Finalmente, agradecemos a nuestras familias por su respaldo, paciencia y motivación, y a nuestros amigos por el apoyo brindado durante el proceso. De igual manera, agradecemos a quienes estuvieron presentes en este camino, brindándonos compañía, comprensión y palabras de aliento en los momentos de mayor exigencia.

Bryan Alvia, Michel Zambrano.

## RESUMEN

El presente trabajo analiza el efecto de la incorporación de fibra de pseudotallo de plátano en los parámetros volumétricos y en la respuesta Marshall de una mezcla asfáltica para capa de rodadura, a fin de analizar su relación con la susceptibilidad al fisuramiento por fatiga. Se definió una mezcla de control mediante el método Marshall, adoptando el contenido óptimo de asfalto (OAC) con el criterio de  $V_a = 4\%$ .

La fibra se preparó mediante secado y corte a longitudes del orden de 1,5–2,0 cm, y se incorporó en contenidos de 0,3%, 0,4% y 0,5%, ensayando dos briquetas por nivel.

Se determinaron Estabilidad corregida y Flujo, además de Gmm (Rice) y Gmb (bulk por condición SSD), con los que se calcularon  $V_a$ , VMA y VFA.

En los resultados, la estabilidad corregida promedio presentó un comportamiento no uniforme, con valores de 3657 lb (control), 3278 lb (0,3%), 3990 lb (0,4%) y 3026 lb (0,5%). El flujo promedio fue 13.0; 11.5; 13.5 y 18.0 (0,01") para control, 0,3%, 0,4% y 0,5%, respectivamente.

En la volumetría,  $V_a$  aumentó de 4,03% (control) a 4,46%, 4,75% y 5,18%, mientras que Gmb disminuyó de 2,254 g/cm<sup>3</sup> a 2,253, 2,245 g/cm<sup>3</sup> y 2,232 g/cm<sup>3</sup>; VMA aumentó de 16,01% a 16,55%, 17,32% y 18,06%, y VFA disminuyó de 74,82% a 73,41%, 72,56% y 71,34%.

**Palabras clave:** mezcla asfáltica, fibra de pseudotallo de plátano, método Marshall, volumetría ( $V_a$ –VMA–VFA), estabilidad y flujo.

## ABSTRACT

This study evaluates the effect of banana pseudostem fiber on the volumetric properties and Marshall response of a hot mix asphalt (HMA) wearing course, in order to analyze its relationship with fatigue cracking susceptibility, using an unmodified control mixture as baseline. A control mix was designed using the Marshall method, selecting the optimum asphalt content (OAC) under the criterion of  $V_a = 4\%$ .

The fiber was dried and cut ( $\approx 1.5\text{--}2.0$  cm) and incorporated at 0.3%, 0.4%, and 0.5% by mixture mass, preparing two specimens per fiber content.

Marshall corrected stability and flow were determined, along with Gmm (Rice) and Gmb (bulk, SSD condition), from which  $V_a$ , VMA, and VFA were calculated.

Results showed a non-monotonic stability response: 3657.4 lbf (control), 3278.7 lbf (0.3%), 3990.1 lbf (0.4%), and 3026.5 lbf (0.5%).

Flow values were 13.3, 11.5, 13.5, and 18.0 (0.01") for control, 0.3%, 0.4%, and 0.5%, respectively.

Volumetrically,  $V_a$  increased from 4.03% (control) to 4.45%, 4.75%, and 5.18%, while Gmb decreased from 2.254 g/cm<sup>3</sup> to 2.253 g/cm<sup>3</sup>, 2.245 g/cm<sup>3</sup>, and 2.232 g/cm<sup>3</sup>; VMA increased (from 15.63% to 16.88%) and VFA decreased (from 74.2% to 69.32%).

**Keywords:** hot mix asphalt, banana pseudostem fiber, Marshall method, volumetrics ( $V_a$ –VMA–VFA), stability and flow.

## SIMBOLOGÍA

### Mezcla, diseño y criterios

**HMA:** mezcla asfáltica en caliente (Hot Mix Asphalt)

**OAC:** Contenido Óptimo de Asfalto (Optimum Asphalt Content)

**AC-20:** ligante asfáltico grado de viscosidad AC-20

### Parámetros Marshall y Volumétricos

**Estabilidad (Marshall):** carga máxima del ensayo Marshall, se incluye Estabilidad Corregida cuando aplique

**Flujo (Marshall):** deformación asociada al ensayo Marshall medida en centésimas de pulgada (0.01")

**Gmm (Rice):** gravedad específica máxima teórica

**Gmb:** gravedad específica bulk de la mezcla compactada

**Va:** vacíos de aire en la mezcla compactada

**VMA:** vacíos en el agregado mineral (Voids in Mineral Aggregate)

**VFA:** vacíos llenos de asfalto (Voids Filled with Asphalt)

**Pb:** contenido de asfalto (Percent of asphalt binder)

**SSD:** condición saturada superficialmente seca

### Propiedades de agregados y absorción

**Gsb:** gravedad específica a granel bulk

**Ps:** porcentaje en masa de agregado en la mezcla

**GsbSSS:** gravedad específica a granel en condición saturada superficialmente seca

**Gsa:** gravedad específica aparente

### **Símbolos de masas usados en los procedimientos (AASHTO T 84/T 85)**

**A:** masa de la muestra seca al horno en aire (g)

**B:** masa de la muestra seca al horno en aire (g)

**C:** masa del picnómetro lleno con agua (g)

**S:** masa de la muestra en condición SSD (g)

**S1:** masa de una segunda muestra SSD (g)

### **Comparación de resultados**

**$\Delta$ :** diferencia absoluta ( $X_{fibra} - X_{control}$ )

**% $\Delta$ :** variación porcentual relativa al control

## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>21</b>
1.1. TEMA.....	21
1.2. ANTECEDENTES.....	21
1.3. PROBLEMÁTICA.....	22
1.4. OBJETIVOS.....	23
1.4.1. <i>Objetivo General</i> .....	23
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	23
1.5. JUSTIFICACIÓN.....	23
1.6. ALCANCE Y LIMITACIONES.....	24
1.7. HIPÓTESIS.....	25
1.8. VARIABLES.....	25
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>27</b>
2.1 PAVIMENTOS FLEXIBLES Y FUNCIÓN DE LA CAPA DE RODADURA.....	27
2.1.1 <i>Definición de pavimento flexible y estructura típica</i> .....	27
2.1.2 <i>Función de la capa de rodadura y requerimientos funcionales</i> .....	28
2.2 MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE PARA CAPA DE RODADURA.....	29
2.2.1 <i>Definición de mezcla asfáltica en caliente (HMA)</i> .....	29
2.3 MATERIALES CONSTITUTIVOS DE LA MEZCLA.....	29
2.3.1 <i>Agregados pétreos</i> .....	30
2.3.1.1 Clasificación y función en el esqueleto mineral.....	30
2.3.1.2 Granulometría y curva de diseño.....	30
2.3.1.3 Gravedad específica y absorción.....	31
2.3.1.4 Requisitos físicos típicos.....	33
2.3.2 <i>Filler mineral</i> .....	33
2.3.2.1 Definición y función en la matriz mastic.....	33
2.3.2.2 Requisitos y especificación del filler.....	34
2.3.3 <i>Ligante asfáltico</i> .....	34

2.3.3.1	Función del ligante en mezclas densas .....	35
2.3.3.2	Ensayos tradicionales del ligante.....	36
2.4	PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS .....	36
2.4.1	<i>Densidades y gravedades específicas</i> .....	36
2.4.2	<i>Vacíos</i> .....	37
2.4.2.1	Vacíos de aire (Va).....	37
2.4.2.2	Vacíos en el agregado mineral (VMA).....	38
2.4.2.3	Vacíos llenos de asfalto (VFA) .....	38
2.4.3	<i>Contenido de asfalto (Pb)</i> .....	38
2.5	MÉTODO MARSHALL COMO MÉTODO DE DISEÑO.....	39
2.5.1	<i>Fundamento del método Marshall y su uso en mezclas densas</i> .....	39
2.5.2	<i>Preparación general de especímenes y filosofía de compactación</i> .....	40
2.5.3	<i>Parámetros Marshall: Estabilidad y Flujo</i> .....	41
2.5.4	<i>Determinación del contenido óptimo de asfalto (OAC) bajo Marshall</i> .....	41
2.5.5	<i>Criterios de diseño para capa de rodadura</i> .....	42
2.6	ENSAYOS DE LABORATORIO VINCULADOS A VOLUMETRÍA Y MARSHALL .....	43
2.6.1	<i>Ensayo Marshall (Estabilidad y Flujo)</i> .....	43
2.6.2	<i>Gravedad específica máxima teórica (Gmm - Rice)</i> .....	44
2.6.3	<i>Gravedad específica bulk de la mezcla compactada (Gmb)</i> .....	45
2.6.4	<i>Cálculo de Va, VMA y VFA a partir de Gmm y Gmb</i> .....	45
2.7	REVISIÓN DEL USO DE FIBRAS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN LITERATURA PREVIA .....	47
2.7.1	<i>Clasificación: fibras sintéticas, minerales y naturales</i> .....	47
2.7.2	<i>Variables que gobiernan el efecto de la fibra en la mezcla</i> .....	47
2.7.2.1	Contenido o dosificación.....	47
2.7.2.2	Longitud y morfología.....	48
2.7.2.3	Dispersión .....	48
2.7.3	<i>Efectos reportados en Va, VMA, VFA y en Estabilidad/Flujo</i> .....	48
2.7.3.1	Estabilidad Marshall.....	48
2.7.3.2	Flujo Marshall .....	49

2.7.3.3 Vacíos de aire (Va) y Vacíos en el Agregado Mineral (VMA) .....	49
<b>CAPÍTULO III: METODOLOGÍA .....</b>	<b>50</b>
3.1 ENFOQUE, TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN .....	50
3.2 LOCALIZACIÓN, OBTENCIÓN DE MATERIALES Y LUGAR DE EJECUCIÓN .....	51
3.3 MATERIALES EMPLEADOS .....	52
3.3.1 Agregados pétreos. ....	52
3.3.2 Ligante asfáltico (AC-20) .....	53
3.3.3 Pseudotallo de plátano .....	53
3.4 EQUIPOS Y HERRAMIENTAS DE LABORATORIO .....	53
3.5 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES .....	58
3.5.1 Análisis granulométrico por fracción .....	58
3.5.2 Gravedad específica de agregados por fracción .....	61
3.5.3 Gravedad específica equivalente de la mezcla de agregados .....	63
3.5.4 Granulometría de la mezcla combinada y verificación con límites de especificación.....	64
3.6 DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA DE CONTROL POR MÉTODO MARSHALL.....	66
3.6.1 Parámetros de diseño y condiciones de fabricación.....	66
3.6.2 Dosificación y combinación de agregados .....	67
3.7 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO (OAC) – MEZCLA CONTROL .....	68
3.7.1 Contenidos evaluados y número de especímenes.....	68
3.7.2 Elaboración de briquetas.....	69
3.7.3 Ensayos en briquetas y datos registrados .....	76
3.7.4 Procesamiento de datos volumétricos y criterio para seleccionar OAC .....	79
3.8 PREPARACIÓN DE LA FIBRA Y MÉTODO DE INCORPORACIÓN .....	79
3.8.1 Preparación .....	79
3.8.2 Base de cálculo del % de fibra y método de adición .....	80
3.9 ELABORACIÓN DE BRIQUETAS CON FIBRA.....	81
3.9.1 Matriz experimental.....	81
3.9.2 Procedimiento de mezclado y compactación .....	82

3.10 ENSAYOS EN BRIQUETAS CON FIBRA.....	83
3.11 CRITERIOS DE COMPARACIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS.....	84
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS .....</b>	<b>85</b>
4.1 RESULTADOS DEL DISEÑO MARSHALL – MEZCLA CONTROL.....	85
4.1.1 Resultados del ensayo Rice ( <i>Gmm</i> ) vs % de asfalto.....	85
4.1.2 Resultados volumétricos y Marshall por contenido de asfalto .....	86
4.1.3 Curvas Marshall .....	87
4.2 RESULTADOS DE BRIQUETAS CON FIBRA.....	90
4.2.1 Resultados base: <i>Gmb</i> , <i>Gmm</i> y <i>Va</i> , por nivel de fibra .....	90
4.2.2 Resumen estadístico por tratamiento.....	95
4.2.3 Gráficos de comparación.....	95
4.2.4 Comparación directa contra la mezcla control .....	100
4.3 SÍNTESIS .....	105
<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>106</b>
5.1 CONCLUSIONES .....	106
5.2 RECOMENDACIONES .....	108
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>109</b>

## Índice de figuras

<b>Figura 1:</b> Capas básicas del pavimento de la calzada.....	28
<b>Figura 2:</b> Macrolocalización y microlocalización de la fuente de agregados y laboratorio .....	52
<b>Figura 3:</b> Equipo Rice (Gmm): frasco/picnómetro y bomba de vacío .....	54
<b>Figura 4:</b> Calentador a Baño María termostatado para acondicionamiento de briquetas	55
<b>Figura 5:</b> Prensa Marshall para determinación de estabilidad y flujo .....	55
<b>Figura 6:</b> Horno industrial para secado y calentamiento de agregados .....	56
<b>Figura 7:</b> Balanza digital de precisión para pesaje de materiales y especímenes.....	56
<b>Figura 8:</b> Compactador Marshall manual y moldes para elaboración de briquetas.....	57
<b>Figura 9:</b> Manómetro del sistema de vacío para ensayo Rice (control de presión/vacío) .....	57
<b>Figura 10:</b> Juego de tamices para análisis granulométrico de agregados .....	58
<b>Figura 11:</b> Tamizado manual para determinación granulométrica de los agregados .....	61
<b>Figura 12:</b> Eliminación de aire atrapado en el picnómetro para gravedad específica ....	63
<b>Figura 13:</b> Curva granulométrica de la mezcla de agregados y faja de especificación (mínima y máxima).....	65
<b>Figura 14:</b> Registro fotográfico del control de temperatura .....	67
<b>Figura 15:</b> Preparación y mezclado en caliente de briquetas de control .....	75
<b>Figura 16:</b> Compactación Marshall (75 golpes por cara) en briquetas de control.....	75
<b>Figura 17:</b> Determinación de Gmb (bulk): pesaje sumergido de briquetas.....	76
<b>Figura 18:</b> Ensayo Rice (Gmm) con bomba de vacío y manómetro. ....	77

<b>Figura 19:</b> Acondicionamiento en baño María y ensayo Marshall en prensa (estabilidad y flujo).....	78
<b>Figura 20:</b> Prensa Marshall para rotura de briquetas .....	78
<b>Figura 21:</b> Extracción, lavado y secado de fibra de pseudotallo de plátano.....	80
<b>Figura 22:</b> Pesaje e incorporación de fibra por método de adición (0,3%–0,5%) .....	81
<b>Figura 23:</b> Determinación de Gmb (bulk) en briquetas con fibra.....	83
<b>Figura 24:</b> Ensayo Rice (Gmm) en mezcla con fibra .....	83
<b>Figura 25:</b> Ensayo Marshall en briquetas con fibra (baño María y prensa) .....	84
<b>Figura 26:</b> Relación entre la Gravedad Específica Máxima Teórica (Rice) y el contenido de asfalto en mezcla de control.....	85
<b>Figura 27:</b> Curva Marshall de densidad bulk (Gmb) en función del contenido de asfalto (mezcla control) .....	87
<b>Figura 28:</b> Curva Marshall del flujo en función del contenido de asfalto (mezcla control) .....	87
<b>Figura 29:</b> Curva Marshall de vacíos de aire (Va) en función del contenido de asfalto (mezcla control) .....	88
<b>Figura 30:</b> Curva Marshall de vacíos en el agregado mineral (VMA) en función del contenido de asfalto (mezcla control).....	88
<b>Figura 31:</b> Curva Marshall de estabilidad (carga máxima) en función del contenido de asfalto (mezcla control).....	89
<b>Figura 32:</b> Curva Marshall de vacíos llenos de asfalto (VFA) en función del contenido de asfalto (mezcla control).....	89
<b>Figura 33:</b> Estabilidad corregida promedio vs % de fibra .....	96

<b>Figura 34:</b> Flujo promedio vs % de fibra.....	97
<b>Figura 35:</b> Va promedio vs % de fibra .....	97
<b>Figura 36:</b> VMA promedio vs % de fibra.....	98
<b>Figura 37:</b> VFA promedio vs % de fibra .....	98
<b>Figura 38:</b> Gmb promedio vs % de fibra .....	99
<b>Figura 39:</b> Gmm promedio vs % de fibra .....	99
<b>Figura 40:</b> Histograma de comparación de Estabilidad.....	100
<b>Figura 41:</b> Histograma de comparación de Flujo .....	101
<b>Figura 42:</b> Histograma de comparación de Va .....	102
<b>Figura 43:</b> Histograma de comparación de VMA .....	103
<b>Figura 44:</b> Histograma de comparación de VFA.....	104

## Índice de tablas

<b>Tabla 1:</b> Criterios de diseño Método Marshall .....	42
<b>Tabla 2:</b> Porcentaje de VMA mínimo para los Mezcla .....	43
<b>Tabla 3:</b> Equipos y herramientas de laboratorio .....	53
<b>Tabla 4:</b> Granulometría por fracción: ripio de 3/4” .....	59
<b>Tabla 5:</b> Granulometría por fracción: ripio de 3/8” .....	59
Tabla 6: Granulometría por fracción: cisco .....	60
<b>Tabla 7:</b> Granulometría por fracción: arena de río .....	60
<b>Tabla 8:</b> Gravedades específicas y absorción por fracción.....	62
<b>Tabla 9:</b> Gravedad específica bulk y aparente de la mezcla de agregados, y absorción ponderada.....	64
<b>Tabla 10:</b> Mezcla de agregados: porcentajes de combinación y granulometría combinada. .....	65
<b>Tabla 11:</b> Plantilla de cálculo de dosificación por briqueta para mezcla de control (sin fibra).....	68
<b>Tabla 12:</b> Cálculo de materiales para 1 briqueta de control ( $MT = 1500g$ ) .....	69
Tabla 13: Bases de cálculo del % de fibra .....	81
<b>Tabla 14:</b> Ensayo Rice (Gmm) en función del porcentaje de asfalto y mezcla control..	85
<b>Tabla 15:</b> Propiedades volumétricas y Marshall de la mezcla control para la determinación del OAC .....	86
<b>Tabla 16:</b> Determinación del contenido óptimo de asfalto (OAC).....	90
<b>Tabla 17:</b> Resultados de briquetas con fibra (0,3%).....	90
<b>Tabla 18:</b> Resultados de briquetas con fibra (0,4%).....	92

<b>Tabla 19:</b> Resultados de briquetas con fibra (0,5%).....	93
<b>Tabla 20:</b> Resumen por porcentaje de fibra (promedio y $\pm \Delta/2$ ).....	95
<b>Tabla 21:</b> Comparación en estabilidad corregida (control vs fibra) .....	100
<b>Tabla 22:</b> Comparación en flujo (control vs fibra) .....	101
<b>Tabla 23:</b> Comparación en Va (control vs fibra) .....	102
<b>Tabla 24:</b> Comparación en VMA (control vs fibra) .....	103
<b>Tabla 25:</b> Comparación en VFA (control vs fibra).....	104

## **CAPÍTULO I: Introducción**

### **1.1. Tema**

Análisis del desempeño mecánico y volumétrico de mezclas asfálticas modificadas con fibras de origen agroindustrial

### **1.2. Antecedentes**

Las fibras se han incorporado a mezclas asfálticas como una estrategia de modificación orientada a ajustar el comportamiento del material, y la literatura reciente ha sistematizado sus aplicaciones reportando categorías y su uso en distintos tipos de mezclas, incluyendo aquellas evaluadas mediante criterios volumétricos y ensayos tradicionales de laboratorio (Sharma et al., 2025). En esa misma línea, revisiones de estado del arte resumen que la adición de fibras puede relacionarse con cambios medibles en propiedades de mezclas asfálticas, lo que justifica su evaluación bajo parámetros comparables entre tratamientos (Guo et al., 2023)

En estudios experimentales con fibras vegetales, se han analizado mezclas asfálticas modificadas con fibras de origen natural, por ejemplo, coco y banano, utilizando indicadores de respuesta Marshall y parámetros volumétricos asociados a la compactación para comparar el efecto de la incorporación de fibra frente a mezclas sin modificar (Venkatesh y Suvvari, 2018). Asimismo, se han reportado investigaciones que evalúan el refuerzo de mezclas asfálticas mediante fibras de banano, aportando evidencia técnica sobre su potencial de aplicación en materiales viales (Ferreira da Costa et al., 2020).

En este contexto, el presente trabajo plantea cuantificar, bajo condiciones controladas y con una mezcla base diseñada por Marshall, el efecto de la fibra de pseudotallo de plátano en volumetría (Va, VMA, VFA, Gmb, Gmm) y en estabilidad y flujo.

### 1.3. Problemática

En pavimentos flexibles, la capa de rodadura está sometida a cargas repetidas y a variaciones ambientales que, con el tiempo, pueden generar fisuración, siendo la fatiga uno de los mecanismos más representativos cuando la mezcla trabaja de forma cíclica bajo el tránsito. Este deterioro suele relacionarse con un desequilibrio entre la estructura volumétrica y la capacidad resistente de la mezcla, por un lado, vacíos de aire elevados reflejan una condición de menor densificación y una red interna más permeable; por otro, una respuesta insuficiente de resistencia o una deformabilidad excesiva evidenciada en los parámetros Marshall puede indicar que la mezcla no mantiene un comportamiento estable frente a solicitaciones repetidas.

Dentro de este marco, la incorporación de fibra natural de pseudotallo de plátano plantea la incertidumbre técnica específica de que, al tratarse de un material con geometría y características particulares, su adición puede modificar la compactabilidad, alterar la densidad bulk, y desplazar los vacíos ( $V_a$ , VMA, VFA), además de cambiar la estabilidad y el flujo medidos por Marshall. En consecuencia, si no se determina experimentalmente cómo varían estos indicadores respecto a una mezcla control, existe el riesgo de proponer dosificaciones que incrementen los vacíos o modifiquen la respuesta Marshall en una dirección desfavorable, lo que podría asociarse a mayor propensión al fisuramiento por fatiga.

Por ello, es necesario analizar, bajo condiciones de laboratorio y con un diseño Marshall base, cómo cambia el equilibrio volumétrico-resistente de la mezcla al incorporar distintos porcentajes de fibra, para identificar si el material modificado conserva un comportamiento compatible con una capa de rodadura y no compromete su respuesta frente a cargas repetidas.

## **1.4. Objetivos**

### ***1.4.1. Objetivo General***

Evaluar el efecto de la fibra de pseudotallo de plátano en la volumetría y en la respuesta Marshall de una mezcla asfáltica en caliente para capa de rodadura, a fin de analizar su relación con la susceptibilidad al fisuramiento por fatiga, respecto a una mezcla control.

### ***1.4.2. Objetivos específicos***

- Determinar, para la mezcla control y para cada porcentaje de fibra, la gravedad específica máxima teórica (Gmm) y la gravedad específica bulk (Gmb)
- Calcular y comparar los parámetros volumétricos Va, VMA y VFA de la mezcla control y de las mezclas con fibra
- Medir y analizar los parámetros Marshall Estabilidad corregida y Flujo para la mezcla control y los tratamientos con fibra.
- Comparar de manera directa cada tratamiento con fibra respecto a la mezcla control mediante diferencias absolutas y porcentuales.
- Verificar si los valores obtenidos de Va y Flujo al implementar la fibra se mantienen en rangos considerados aceptables para una mezcla de capa de rodadura

## **1.5. Justificación**

La incorporación de fibra de pseudotallo de plátano en mezclas asfálticas para capa de rodadura se plantea como una alternativa de aprovechamiento de un residuo vegetal, con potencial aplicación en materiales viales. En particular, resulta pertinente evaluar su uso porque la adición de fibras puede influir en el proceso de mezclado y compactación, afectando variables que se

reflejan en los parámetros volumétricos (Gmm, Gmb, Va, VMA y VFA) y en la respuesta Marshall (estabilidad y flujo), que constituyen el enfoque del presente estudio.

Desde el enfoque ambiental, el aprovechamiento de subproductos agrícolas se relaciona con prácticas de economía circular, al incorporar materiales que de otro modo serían descartados. En ese sentido, analizar el efecto de esta fibra mediante ensayos Marshall y cálculos volumétricos aporta información técnica verificable en laboratorio, útil para sustentar comparaciones objetivas frente a una mezcla control y para documentar el comportamiento de la mezcla dentro del rango de dosificación evaluado, sin extender el alcance a ensayos de desempeño no contemplados en esta investigación.

### **1.6. Alcance y limitaciones**

El presente trabajo de titulación se enfoca en analizar, a nivel de laboratorio, el efecto de la incorporación de fibra de pseudotallo de plátano en una mezcla asfáltica en caliente destinada a capa de rodadura, mediante la evaluación de parámetros volumétricos y de resistencia Marshall. El estudio contempla una mezcla control (sin fibra), utilizada como referencia para la comparación, y mezclas modificadas con contenidos de fibra de 0,3%, 0,4% y 0,5%.

El alcance experimental comprende la fabricación de briquetas Marshall bajo condiciones de preparación y compactación equivalentes para todos los tratamientos, así como la ejecución de ensayos vinculados al método Marshall y a la determinación de propiedades volumétricas. En particular, se determinan la gravedad específica máxima teórica (Gmm) mediante el ensayo Rice, la gravedad específica bulk de la mezcla compactada (Gmb), y se calculan los parámetros Va, VMA y VFA. Adicionalmente, se evalúan la estabilidad y el flujo Marshall, incluyendo la

estabilidad corregida cuando corresponde, con el fin de establecer comparaciones objetivas entre la mezcla control y las mezclas con fibra dentro del rango de dosificación estudiado.

Como limitaciones, el trabajo no incorpora ensayos de desempeño mecanicista o de durabilidad, por lo que las conclusiones se restringen a la respuesta volumétrica y Marshall obtenida en laboratorio. Asimismo, no se desarrolla un análisis económico del material ni una caracterización experimental detallada de la fibra, debido a que el objetivo del estudio se centra en la respuesta de la mezcla asfáltica medida mediante los indicadores seleccionados.

### 1.7. Hipótesis

La incorporación de fibra de pseudotallo de plátano en una mezcla asfáltica para capa de rodadura modifica los parámetros volumétricos y la respuesta Marshall (estabilidad y flujo) respecto a la mezcla control, dentro del rango de dosificación evaluado (0,3%–0,5%).

### 1.8. Variables

- **Variable independiente:** Contenido de fibra de pseudotallo de plátano en la mezcla (% en masa de mezcla): 0,0% (control), 0,3%, 0,4% y 0,5%.
- **Variables dependientes:**
  - Gravedad específica máxima teórica de la mezcla (Gmm).
  - Gravedad específica bulk de la mezcla compactada (Gmb).
  - Vacíos de aire (Va).
  - Vacíos en el agregado mineral (VMA).
  - Vacíos llenos de asfalto (VFA).
  - Estabilidad Marshall (incluida estabilidad corregida, cuando aplique).
  - Flujo Marshall.

- **VARIABLES CONTROLADAS:**
  - Gradación de agregados y origen de materiales
  - Contenido de asfalto (%Pb) definido por el diseño de la mezcla control y aplicado según el esquema experimental.
  - Condiciones de mezclado y compactación
  - Procedimientos de ensayo y cálculo (Rice–Gmm, Gmb, Marshall, y cálculo de  $V_a/VMA/VFA$ ).

## **CAPÍTULO II: Marco teórico**

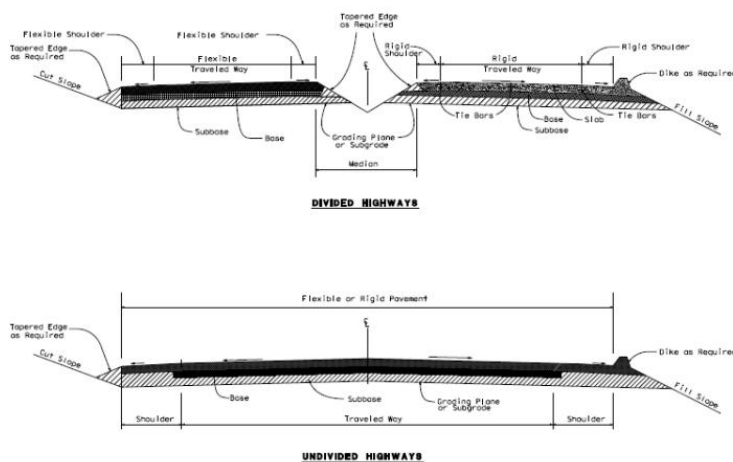
### **2.1 Pavimentos flexibles y función de la capa de rodadura**

#### ***2.1.1 Definición de pavimento flexible y estructura típica***

Un pavimento flexible es el que la capa de superficie corresponde a una capa estructural ligada con asfalto y se apoya sobre una base no rígida. Su lógica estructural es la de un sistema por capas, cada estrato se diseña para transmitir y distribuir las cargas de tránsito de forma que la capa inferior las soportae adecuadamente durante la vida de diseño. (California Department of Transportation, 2022)

En su configuración típica, la estructura se organiza desde la subrasante hacia arriba con subbase, base y capa de superficie. La subrasante corresponde al suelo natural o material de terraplén sobre el cual se colocan las capas superiores; la subbase funciona como fundación o plataforma de trabajo y puede aportar control de finos, drenaje y soporte; la base es el material seleccionado y procesado colocado inmediatamente bajo la superficie y contribuye a la distribución de cargas y, según el caso, al drenaje; y la superficie corresponde a una o más capas diseñadas para acomodar y distribuir cargas de tránsito y cumplir funciones de servicio. (California Department of Transportation, 2022)

**Figura 1:**  
*Capas básicas del pavimento de la calzada*



*Nota. Tomado del Highway Design Manual: Chapter 600 – Pavement Engineering, (California Department of Transportation, 2022).*

### **2.1.2 Función de la capa de rodadura y requerimientos funcionales**

La capa de rodadura se define por su función de servicio y protección dentro del sistema multicapa. Entre sus objetivos se puede decir que se encarga de acomodar y distribuir cargas de tránsito, aportar resistencia al deslizamiento, reducir efectos dañinos del clima, mejorar el drenaje superficial, reducir el ruido llanta–pavimento y minimizar la infiltración de agua superficial hacia base, subbase y subrasante. (California Department of Transportation, 2022)

En el desempeño funcional de seguridad, la textura superficial se interpreta en dos escalas complementarias. La microtextura corresponde a la textura fina en la superficie del agregado (por debajo de 0,5 mm) que interactúa directamente con el caucho y contribuye a la adhesión, su pérdida progresiva por tránsito se relaciona con el pulimento. La macrotextura es una textura de mayor escala (0,5 a 50 mm), influida por el diseño de mezcla y/o por el acabado, y su papel es facilitar

canales de drenaje para expulsar agua en la interfaz llanta–pavimento, mejorando la fricción y reduciendo el riesgo de hidropneumático, especialmente a mayores velocidades. (Tobias et al., 2023)

Sobre la impermeabilidad y durabilidad, se usa como criterio que la surfacing asfáltica densa tenga una baja permeabilidad, ya que esto contribuye a proteger las capas inferiores frente al ingreso de agua, lo que se une directamente con la durabilidad del sistema. Esto se alinea con la función de la capa superficial descrita como barrera para minimizar la infiltración hacia las capas subyacentes. (SABITA, 2021)

## **2.2 Mezclas asfálticas en caliente para capa de rodadura**

### ***2.2.1 Definición de mezcla asfáltica en caliente (HMA)***

Una mezcla asfáltica en caliente es un material compuesto por agregados y un ligante asfáltico, que es compactado hasta formar una masa uniforme para su uso en pavimentos (National Asphalt Pavement Association; Federal Highway Administration, 2001, p. 23).

Asimismo, el rasgo operativo que explica la denominación “en caliente” es que la mezcla debe originarse en planta bajo condiciones controladas y, tras el transporte, se compacta mientras aún sigue caliente (Wisconsin Asphalt Pavement Association, 2020, p. 2). Por consiguiente, el concepto de HMA no se restringe únicamente a los agregados y el asfalto, sino que une el elemento de producción industrial, control del proceso y compactación en estado térmicamente trabajable (Wisconsin Asphalt Pavement Association, 2020, p. 2).

## **2.3 Materiales constitutivos de la mezcla**

En mezclas asfálticas, los materiales se integran para formar una estructura compuesta en la que el arreglo del agregado define el esqueleto resistente, mientras que el ligante y el material

fino aportan cohesión, adhesión e impermeabilidad en función del tipo de mezcla y del gradado seleccionado. (SABITA, 2024)

### ***2.3.1 Agregados pétreos***

Los agregados forman la fracción predominante de la mezcla y, el modo en que se combinan sus fracciones controla simultáneamente la gradación (distribución de tamaños), el tipo de contacto entre partículas y el volumen de vacíos disponible para ser ocupado por ligante y finos. (SABITA, 2024)

#### **2.3.1.1 Clasificación y función en el esqueleto mineral**

En especificaciones viales, la distinción operativo funcional entre agregado fino y agregado grueso se apoya en el tamaño, determinado por tamices normalizados. Normalmente se describe la arena como agregado fino pasante por el tamiz INEN 4,75 mm (equivalente al tamiz No. 4), estableciendo así un criterio práctico de separación por tamaño para el control de fracciones. (Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, 2025)

Visto de una forma estructural de la mezcla, la fracción gruesa puede actuar como elemento portante cuando desarrolla contacto interparticular y conforma una matriz de agregados interconectados, en ese caso, la fracción fina y el ligante rellenan los espacios y contribuyen a estabilizar la estructura sin dilatar el esqueleto. (SABITA, 2024)

#### **2.3.1.2 Granulometría y curva de diseño**

La granulometría del agregado es la distribución de tamaños de partícula que se obtiene en un análisis por tamizado. El método ASTM C136/C136M nos dice que el ensayo determina la distribución de tamaños por separación en una serie de tamices y que los resultados se usan para

determinar el cumplimiento con requisitos de gradación y para el control de la producción de agregados. (ASTM International, 2019)

En el contexto de especificaciones viales ecuatorianas, el control de la granulometría de agregados para ciertos rubros se vincula explícitamente al ensayo INEN 696 (y, cuando aplique, INEN 697) como referencia para comprobar la gradación exigida. (Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, 2025). En consecuencia, la curva de diseño se sustenta en los porcentajes de material que pasan por cada tamiz obtenidos del análisis granulométrico, los que son la base para verificar el cumplimiento frente a límites o bandas granulométricas definidos por la entidad competente. (ASTM International, 2019)

### **2.3.1.3 Gravedad específica y absorción**

Para agregado fino, el FOP para AASHTO T 84 (referido explícitamente como “in accordance with AASHTO T 84-22”) define que se determinan la gravedad específica a granel ( $Gsb$ ), la gravedad específica a granel en condición saturada superficialmente seca ( $GsbSSD$ ), la gravedad específica aparente ( $Gsa$ ) y la absorción. (Washington Asphalt Quality Tracking Committee, 2024). En este procedimiento, las magnitudes se calculan a partir de las masas A, B, C, S y S1 (definidas por el propio documento) mediante las expresiones siguientes:

$$Gsb = \frac{A}{B + S - C}$$

$$GsbSSD = \frac{S}{B + S - C}$$

$$Gsa = \frac{A}{B + A - C}$$

$$\text{Absorción (\%)} = \left[ \frac{S1 - A}{A} \right] \times 100$$

donde:

A = masa de la muestra seca al horno en aire (g)

B = masa del picnómetro lleno con agua (g)

C = masa del picnómetro + muestra + agua (g)

S = masa de la muestra en condición SSD (g)

S1 = masa de una segunda muestra SSD (g)

(Washington Asphalt Quality Tracking Committee, 2024)

Para agregado grueso, el procedimiento “FOP for AASHTO T 85” establece el cálculo de Gsb, GsbSSD, Gsa y absorción, indicando además que no está destinado para agregados livianos.

(Washington State Department of Transportation, 2026). Las variables A, B y C se definen en el documento, y se emplean las expresiones:

- $Gsb = A / (B - C)$
- $GsbSSD = B / (B - C)$
- $Gsa = A / (A - C)$
- $\text{Absorción (\%)} = [(B - A) / A] \times 100$

donde:

A = masa seca al horno (g)

B = masa SSD (g)

C = masa en agua (g)

(Washington State Department of Transportation, 2026)

#### **2.3.1.4 Requisitos físicos típicos**

En especificaciones viales, los agregados para mezclas asfálticas deben cumplir requisitos de limpieza y condición, además de que estos aseguren condiciones de manejo y almacenamiento que eviten contaminación y humedad no controlada durante la preparación. (Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, 2025)

Se establecen controles típicos de calidad asociados a resistencia al desgaste, limpieza de finos, textura y forma efectiva para el desempeño, mediante límites y métodos de ensayo. Normalmente, se especifican verificaciones como abrasión Los Ángeles para el agregado grueso, equivalente de arena para el agregado fino y porcentaje de caras fracturadas en el agregado grueso, entre otros, como parte del aseguramiento de calidad de materiales. (Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, 2025)

#### **2.3.2 Filler mineral**

En mezclas asfálticas, el filler o polvo mineral es un componente esencial para producir mezclas asfálticas densas, cohesivas, durables y resistentes a la penetración de agua. Se distingue entre fillers inertes (polvo natural o harina de roca) y fillers activos (cal hidratada o cemento), según su efecto dentro de la mezcla. (SABITA, 2024)

##### **2.3.2.1 Definición y función en la matriz mastic**

En una mezcla asfáltica, el filler cumple funciones directamente relacionadas con la matriz mastic (ligante + finos), este actúa como una extensión del ligante al endurecer el mastic y la

mezcla, lo que ayuda a mejorar la estabilidad, también funciona como material de relleno de vacíos para ajustar gradaciones y propiedades volumétricas; y, cuando se emplean fillers activos como la cal, puede mejorar la unión entre el ligante y el agregado. (SABITA, 2024)

El contenido de filler debe controlarse ya que influye en la cohesión y en la compactabilidad, cantidades adecuadas mejoran la cohesión, mientras que en exceso rigidiza el material y complica la compactación, y una cantidad insuficiente reduce la cohesión y puede provocar desintegración del material. (SABITA, 2021)

### **2.3.2.2 Requisitos y especificación del filler**

Como especificación base, AASHTO M 17 establece requisitos para el filler mineral usado en mezclas asfálticas, incluyendo límites de gradación y criterios de calidad relacionados con impurezas orgánicas y plasticidad. (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2025)

La Federal Highway Administration reproduce en su Tabla 8-3 los requisitos de AASHTO M17 para filler mineral: 100% pasante tamiz No. 30 (600  $\mu\text{m}$ ), 95–100% pasante tamiz No. 50 (300  $\mu\text{m}$ ) y 70–100% pasante tamiz No. 200 (75  $\mu\text{m}$ ); además indica que el filler debe estar libre de impurezas orgánicas y con índice de plasticidad no mayor que 4. (Federal Highway Administration, s.f.)

### **2.3.3 Ligante asfáltico**

El ligante asfáltico es el material bituminoso que dentro de una mezcla asfáltica densa actúa como recubrimiento para las partículas del agregado y permite su unión como un material compuesto. En especificaciones técnicas usadas en Ecuador para mezclas asfálticas en caliente se establece, de forma explícita, el uso de cemento asfáltico AC20, de origen petrolero y obtenido

por destilación directa del crudo, sin aditivos no autorizados, además de requisitos de uniformidad (homogeneidad), ausencia de agua y comportamiento estable al calentamiento. (Empresa Pública Vialmin-EP, 2025)

En documentos técnicos de control de calidad para el AC-20 se reporta su caracterización bajo la norma NTE INEN 2515-2010, incluyendo parámetros de consistencia y propiedades asociadas a su comportamiento en servicio (viscosidad, penetración, ductilidad y punto de ablandamiento). (Empresa Pública Petroecuador, 2016)

### **2.3.3.1 Función del ligante en mezclas densas**

En mezclas densas, el ligante cumple una doble función mecánica, por un lado aporta adhesión y por otro, aporta cohesión dentro del mastic (ligante + fracción fina), contribuyendo a que el esqueleto mineral se mantenga integrado bajo las distintas cragas. En guías técnicas se indica que la resistencia a la deformación permanente a temperaturas elevadas depende de la adhesión del enlace del ligante con el agregado y de la resistencia cohesiva del ligante frente al flujo viscoso en condiciones térmicas críticas. (SABITA, 2024)

La sensibilidad térmica del ligante se manifiesta en cambios de viscosidad con la temperatura, lo que afecta directamente la mezcla en fabricación y compactación: se recomienda definir temperaturas de mezclado y compactación en función de rangos de viscosidad del ligante (relación temperatura–viscosidad provista por el proveedor), para asegurar trabajabilidad sin comprometer el desempeño. Este enfoque es coherente con especificaciones de suministro que exigen un cemento asfáltico estable al calentamiento, homogéneo y libre de agua, para evitar comportamientos indeseados durante el proceso de producción. (SABITA, 2021) (Empresa Pública Vialmin-EP, 2025)

### **2.3.3.2 Ensayos tradicionales del ligante**

Las especificaciones técnicas empleadas para mezcla asfáltica en caliente en Ecuador suelen exigir que el cemento asfáltico AC20 cumpla requisitos por ensayo, citando métodos AASHTO para propiedades tradicionales del AC20. Se listan ensayos como penetración, viscosidad, punto de inflamación, gravedad específica y punto de ablandamiento, y se exige respaldo documental mediante certificados recientes del fabricante que verifiquen el cumplimiento. (Empresa Pública Vialmin-EP, 2025)

## **2.4 Parámetros volumétricos en mezclas asfálticas**

Los parámetros volumétricos describen la estructura interna de una mezcla asfáltica compactada, es decir, cómo se distribuye el agregado, el ligante y el aire dentro del volumen total del espécimen (Asphalt Institute, 2014). En el método Marshall, estos indicadores se emplean para interpretar si la mezcla posee un nivel de vacíos compatible con durabilidad y estabilidad bajo servicio, y para controlar la sensibilidad de la mezcla entre variaciones de contenido de ligante y compactación (Asphalt Institute, 2014).

### **2.4.1 Densidades y gravedades específicas**

La gravedad específica máxima teórica de una mezcla asfáltica,  $G_{mm}$ , representa la gravedad específica que corresponde a una condición ideal en la que el material se considera sin vacíos de aire, y se determina mediante un procedimiento de desaireación bajo vacío comúnmente conocido como ensayo Rice. (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012). En términos conceptuales, la  $G_{mm}$  funciona como referencia de densidad límite superior para esa composición de materiales, porque excluye el volumen de aire atrapado (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012).

Por su parte, la gravedad específica aparente Bulk de la mezcla compacta, Gmb, es la gravedad específica del espécimen ya compactado y junta el efecto del volumen de aire existente en el cuerpo del espécimen, por lo que es un indicador directo del estado de densificación alcanzado en laboratorio (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2013). La obtención de la Gmb se basa en la condición saturada superficialmente seca, SSD, del espécimen y en el pesaje en aire y en agua, de manera que el volumen del espécimen se deriva del principio de empuje (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2013).

## **2.4.2 Vacíos**

### **2.4.2.1 Vacíos de aire (Va)**

Los vacíos de aire corresponden a las pequeñas cavidades de aire que permanecen entre las partículas de agregado recubiertas por ligante dentro de una mezcla compactada (Asphalt Institute, 2014). Esta variable se interpreta como una medida del grado de cierre de la estructura, teniendo así que valores superiores indican una mezcla más abierta, mientras que valores menores reflejan una mezcla más densa (Asphalt Institute, 2014).

Desde el punto de vista del desempeño el nivel de gaseoso vincula con mecanismos típicos de deterioro. Por un lado, contenidos elevados de vacíos favorecen la conectividad de poros, lo cual incrementa la posibilidad de ingreso de aire y agua con implicaciones en durabilidad (Asphalt Institute, 2014). Por otro lado, contenidos excesivamente bajos de vacío se asocian con riesgo de inestabilidad bajo cargas y temperatura, debido a que la mezcla puede tender a deformarse plásticamente (Asphalt Institute, 2014).

#### **2.4.2.2 Vacíos en el agregado mineral (VMA)**

El VMA se define como el espacio intergranular existente entre las partículas de agregado dentro de una mezcla compactada, expresado como porcentaje del volumen total; en ese espacio se alojan tanto el aire ( $V_a$ ) como el ligante efectivo que recubre y separa partículas (Asphalt Institute, 2014). En otras palabras, el VMA cuantifica el volumen disponible del esqueleto mineral para contener ligante y vacíos y por ello se interpreta como un descriptor de la geometría y el empaquetamiento del agregado (Asphalt Institute, 2014).

#### **2.4.2.3 Vacíos llenos de asfalto (VFA)**

El VFA representa la fracción del VMA que está ocupada por asfalto, y se expresa como porcentaje (Asphalt Institute, 2014). Conceptualmente, si el VMA es la suma de aire y ligante, el VFA indica cuánto de esa sumatoria está efectivamente compuesto por ligante, por lo que se interpreta como un indicador directo del contenido relativo de ligante en el sistema de vacíos (Asphalt Institute, 2014).

En el plano interpretativo, el VFA se utiliza como criterio complementario, porque  $V_a$ , VMA y VFA están interrelacionados, es decir, si se fijan dos de ellos, el tercero queda determinado (Asphalt Institute, 2014). De este modo el VFA ayuda a restringir diseños que, aunque cumplan un  $V_a$  objetivo, podrían presentar combinaciones marginales de VMA y contenido de ligante que afectan estabilidad o durabilidad (Asphalt Institute, 2014).

#### **2.4.3 Contenido de asfalto ( $P_b$ )**

El  $P_b$  se entiende como el contenido total de ligante asfáltico en la mezcla, expresado típicamente como porcentaje en masa total de la mezcla (Asphalt Institute, 2014). Además, se distingue entre contenido total y contenido efectivo de ligante, que es la parte de ligante que

permanece disponible recubriendo partículas, porque una fracción puede ser absorbida por el agregado dependiendo de su porosidad y características superficiales (Asphalt Institute, 2014).

El contenido de ligante rige tendencias típicas en la respuesta volumétrica, por ejemplo, al incrementarse Pb, el contenido de vacíos de aire tiende a disminuir de forma sostenida, porque aumenta el volumen de ligante disponible para ocupar espacios y mejorar la compactación interna (Asphalt Institute, 2014). En cambio, el VMA suele presentar un comportamiento no tan estricto, puede disminuir inicialmente por una mejor acomodación o compactación, y luego aumentar cuando el exceso de ligante comienza a separar partículas del agregado (Asphalt Institute, 2014). Consecuentemente, el VFA aumenta con Pb, en tanto una mayor proporción del VMA queda ocupada por asfalto (Asphalt Institute, 2014).

## **2.5 Método Marshall como método de diseño**

### ***2.5.1 Fundamento del método Marshall y su uso en mezclas densas***

El método Marshall es un enfoque empírico para evaluar y diseñar mezclas asfálticas densas, basado en el comportamiento de probetas cilíndricas compactadas en laboratorio y ensayadas bajo carga a una temperatura controlada durante los ensayos. En su forma clásica, el ensayo puede cuantificar la resistencia de la mezcla a la deformación plástica mediante la carga máxima que soporta la probeta antes de perder estabilidad y la deformación asociada a ese punto de carga. Esto permite comparar alternativas de mezcla y verificar que en el mismo nivel de compactación, la combinación del agregado con el ligante produce una respuesta consistente frente a un estado de carga estandar. (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008)

En el contexto vial, el Marshall no se usa de forma aislada, sino que se integra con criterios volumétricos y umbrales mínimos y máximos para aceptación de mezclas de capa de rodadura. En Ecuador, los criterios de aceptación para hormigón asfáltico en capa de rodadura se estructuran por nivel de tránsito, vinculando el esfuerzo de compactación (golpes por cara) con rangos/umbras de Estabilidad y Flujo, y con requisitos volumétricos como vacíos de aire y VMA. (Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, 2025)

### ***2.5.2 Preparación general de especímenes y filosofía de compactación***

El propósito de la compactación Marshall es reproducir mediante un procedimiento controlado, un nivel de densificación representativo del que se usará en obra, por eso el método trabaja con probetas cilíndricas compactadas a un esfuerzo ya definido y comparable entre mezclas. El ensayo se aplica a especímenes de geometría estandarizada, y el resultado (Estabilidad y Flujo) se interpreta como respuesta del “esqueleto mineral + mástico” frente a una solicitud de carga con confinamiento lateral propio de la prensa Marshall. (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008)

En especificaciones ecuatorianas, el esfuerzo de compactación se define dependiendo del nivel de tránsito proyectado, y se aplica como golpes por cara, lo cual conecta con el control de desempeño esperado en la capa de rodadura. Por ejemplo, para hormigón asfáltico en capa de rodadura, la tabla de criterios Marshall establece 75 golpes por cara para tránsito muy pesado y pesado, y 50 golpes por cara para tránsito medio y liviano; este mismo bloque normativo asocia esos niveles con umbrales de estabilidad/flujo y requisitos volumétricos. (Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, 2025)

### ***2.5.3 Parámetros Marshall: Estabilidad y Flujo***

La Estabilidad Marshall es la carga máxima que se registra en el ensayo, que es aplicada sobre la probeta a temperatura controlada mediante la prensa Marshall, esta es la capacidad de la mezcla compactada para resistir deformación plástica bajo una sollicitación estandarizada. El Flujo Marshall es la deformación total que presenta la probeta en el momento que se alcanza la carga máxima, y se reporta en unidades del comparador, por lo que su lectura es un indicador de cuánto se deforma en el pico de carga. (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008)

En diseño y aceptación, estabilidad y flujo se interpretan en conjunto, ya que una estabilidad insuficiente se asocia a baja resistencia al ahuellamiento y al corte, mientras que un flujo fuera de rango sugiere mezcla excesivamente rígida (flujo bajo) o excesivamente plástica (flujo alto). Por ello, las especificaciones establecen valores mínimos de estabilidad y rangos admisibles de flujo, diferenciados por nivel de tránsito. (Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, 2025)

### ***2.5.4 Determinación del contenido óptimo de asfalto (OAC) bajo Marshall***

El contenido óptimo de asfalto se determina a partir de un grupo de mezclas de prueba con diferentes contenidos de ligante, manteniendo constante la gradación y el procedimiento de compactación. Para cada contenido se fabrican y ensayan probetas, obteniendo estabilidad, flujo y parámetros volumétricos; con esos resultados se selecciona un contenido de diseño que cumpla los criterios de resistencia y los requisitos volumétricos establecidos para la capa de rodadura. (Asphalt Institute, 2014)

En Ecuador, esto se ve dentro de la “fórmula maestra” y el control de producción, el diseño debe mostrar el porcentaje de asfalto y demostrar cumplimiento con los criterios Marshall y volumétricos aplicables al nivel de tránsito, ya en obra se controla que la dosificación y los resultados se mantengan dentro de tolerancias y umbrales. (Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, 2025).

### 2.5.5 Criterios de diseño para capa de rodadura

Para capa de rodadura, los criterios Marshall de aceptación se organizan por nivel de tránsito (IMDP) y combinan esfuerzo de compactación (golpes/cara), requisito mínimo de estabilidad, rangos admisibles de flujo y requisito de vacíos de aire en mezcla compactada. En la especificación ecuatoriana consultada, estos criterios se presentan explícitamente en la Tabla 405.5.4 para hormigón asfáltico en capa de rodadura, diferenciando tránsito muy pesado, pesado, medio y liviano, además se complementan con requisitos de vacíos del agregado mineral (VMA) mínimos según tamaño máximo nominal del agregado (Tabla 405-5.5). (Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, 2025).

**Tabla 1:**  
*Criterios de diseño Método Marshall*

TIPO DE TRAFICO CRITERIOS MARSHALL	Muy Pesado		Pesado		Medio		Liviano	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
No. De Golpes/Cara	75		75		50		50	
Estabilidad (libras)	2200	----	1800	----	1200	----	1000	2400
Flujo (pulgada/100)	8	14	8	14	8	16	8	16
% de vacíos en mezcla								
- Capa de Rodadura	3	5	3	5	3	5	3	5
- Capa Intermedia	3	8	3	8	3	8	3	8
- Capa de Base	3	9	3	9	3	9	3	9

*Nota. Tomado de Especificaciones técnicas de los rubros especiales, Tabla 405.5.4, (Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, 2025)*

**Tabla 2:***Porcentaje de VMA mínimo para los Mezcla*

Tipo de Mezcla	VAM, Mínimo (%)
A	16
B	15
C, D	14
E	13

*Nota. Tomado de Especificaciones técnicas de los rubros especiales, Tabla 405-5.5, (Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, 2025)*

## **2.6 Ensayos de laboratorio vinculados a volumetría y Marshall**

Los parámetros volumétricos y los indicadores Marshall se obtienen a partir de ensayos estandarizados que cuantifican la resistencia de la mezcla compactada frente a cargas definidas y a temperatura controlada y las gravedades específicas requeridas para describir el contenido de vacíos y la estructura interna de la mezcla (Gmm y Gmb). Estas magnitudes son la base para calcular Va, VMA y VFA de forma consistente con el método Marshall. (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008)

### **2.6.1 Ensayo Marshall (Estabilidad y Flujo)**

El ensayo Marshall mide la resistencia a la deformación plástica de una mezcla asfáltica compactada con la medición de dos parámetros: Estabilidad Marshall y Flujo Marshall. La estabilidad se interpreta como la carga máxima que soporta la mezcla durante la aplicación de carga en el cabezal de rotura mientras que el flujo corresponde a la deformación total por el punto de carga máxima, registrada durante la misma aplicación de carga. Estos parámetros se emplean como indicadores de capacidad resistente y consistencia de deformación de mezclas densas bajo condiciones de ensayo estandarizadas. (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008)

Una estabilidad mayor se asocia con mayor resistencia a flujo plástico en el estado que se ensayó, el flujo complementa la lectura, ya que este describe qué tan deformable resulta el espécimen al alcanzar su carga máxima. La estabilidad y el flujo permiten identificar mezclas potencialmente deformables o mezclas con respuesta más rígida, siempre entendiendo que el resultado depende del método de compactación y de las condiciones controladas del ensayo establecidas por la norma de referencia. (ASTM Internacional, 2022)

### **2.6.2 Gravedad específica máxima teórica (Gmm - Rice)**

La gravedad específica máxima teórica de la mezcla, Gmm, es la gravedad específica de la mezcla asfáltica si no existieran vacíos de aire. Se obtiene por el método de Rice mediante el uso de vacío para eliminar aire atrapado en una muestra suelta de mezcla y la determinación de masas en condiciones definidas por norma. Este parámetro es la referencia básica para cuantificar la densificación/compactación y para calcular los vacíos de aire y otros parámetros volumétricos. (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012)

En términos de cálculo, una forma explícita de determinar Gmm en el método normado se expresa como:

$$Gmm = A / (A + D - E)$$

donde:

A = masa de la muestra seca en aire

D = masa del picnómetro lleno de agua a la temperatura de ensayo

E = masa del picnómetro con la muestra y agua (después de aplicar vacío y completar con agua)

(ASTM International, 2019)

### **2.6.3 Gravedad específica bulk de la mezcla compactada (*Gmb*)**

La gravedad específica bulk de la mezcla compactada, describe la gravedad específica del espécimen compacto considerando su volumen, el cual incluye los vacíos de aire presentes después de la compactación. En el control *Gmb* funciona como el estado real del espécimen compactado, y es el parámetro que, combinado con *Gmm*, permite cuantificar el nivel de vacíos de aire y evaluar consistencia de compactación entre especímenes. (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2013)

Una expresión directa de cálculo utilizada por el método de gravedad específica bulk se presenta como:

$$Gmb = A / (B - C)$$

donde:

A = masa del espécimen seco (aire)

B = masa del espécimen en condición saturada superficialmente seca (SSS/SSD)

C = masa aparente del espécimen en agua

(American Association of State Highway and Transportation Officials, 2013); (ASTM Internacional, 2019)

### **2.6.4 Cálculo de *Va*, *VMA* y *VFA* a partir de *Gmm* y *Gmb***

Los parámetros volumétricos se calculan combinando la condición teórica sin vacíos (*Gmm*) con la condición real compactada (*Gmb*). La obtención de *Gmm* se respalda en el método Rice (AASHTO T 209-12) y la obtención de *Gmb* en el método bulk por SSD (AASHTO T 166-

13), a partir de ambos se calculan los vacíos de aire ( $V_a$ ), los vacíos en el agregado mineral (VMA) y los vacíos llenos de asfalto (VFA), que estructuran la evaluación volumétrica de mezclas densas. (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012); (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2013).

Las expresiones de uso común en diseño volumétrico (presentadas de forma explícita en manuales de diseño) son:

- Vacíos de aire en mezcla compactada,  $V_a$  (%):

$$V_a = 100 \times (1 - G_{mb}/G_{mm})$$

- Vacíos en el agregado mineral, VMA (%):

$$VMA = 100 - (G_{mb} \times P_s)/G_{sb}$$

- Vacíos llenos de asfalto, VFA (%):

$$VFA = 100 \times (VMA - V_a)/VMA$$

donde:

$G_{mm}$  = gravedad específica máxima teórica de la mezcla (Rice)

$G_{mb}$  = gravedad específica bulk de la mezcla compactada

$P_s$  = porcentaje en masa de agregado en la mezcla (porcentaje del total de mezcla)

$G_{sb}$  = gravedad específica bulk (seca) del agregado (referida para el cálculo volumétrico)

(Asphalt Institute, 2014)

## **2.7 Revisión del uso de fibras en mezclas asfálticas en literatura previa**

Las fibras se incorporan a mezclas asfálticas principalmente para estabilizar el ligante cuando existe riesgo de drenado y actuar como refuerzo dentro de la matriz, lo cual puede reflejarse en cambios de parámetros Marshall y en la volumetría cuando se controla la compactación (Guo et al., 2023).

### ***2.7.1 Clasificación: fibras sintéticas, minerales y naturales***

Una clasificación utilizada en revisiones recientes distingue fibras minerales, sintéticas y naturales, y documenta su aplicación en mezclas densas, SMA y OGFC (Sharma et al., 2025). Dentro de esa taxonomía, se reportan como minerales fibras como basalto y vidrio, entre otras; como sintéticas se citan, por ejemplo, poliéster y polipropileno; y como naturales se incluyen fibras de origen vegetal como banano, coco, sisal y celulosa (Sharma et al., 2025).

En el enfoque de este trabajo de titulación, la literatura experimental ha trabajado con fibras vegetales específicas, concretamente de coco y banano, en mezclas SMA, considerando longitudes y contenidos controlados para analizar su respuesta mediante parámetros como la estabilidad y el flujo y variables volumétricas asociadas a la compactación (Venkatesh y Suvvari, 2018, pp. 966, 967).

### ***2.7.2 Variables que gobiernan el efecto de la fibra en la mezcla***

#### **2.7.2.1 Contenido o dosificación**

En SMA se documenta una adición típica de estabilizadores de fibra del orden de 0.3 – 0.4% en peso de mezcla (Targeted Overlay Pavement Solutions, 2022). Se advierte que excesos pueden provocar dispersión desigual y porosidad excesiva en la mezcla, degradando el desempeño,

por lo que el contenido óptimo se identifica experimentalmente (Hui et al., 2022). En SMA con fibras naturales, también se reporta que altos porcentajes dificultan mantener homogeneidad y pueden generar conglomeración de fibra (Venkatesh y Suvvari, 2018, p. 972).

### **2.7.2.2 Longitud y morfología**

La longitud se maneja como variable explícita en investigaciones con fibras vegetales, y se reporta su evaluación junto con el contenido de ligante para observar tendencias en estabilidad, flujo y variables volumétricas bajo compactación (Venkatesh y Suvvari, 2018). En banano para SMA se adoptaron longitudes de entre 5–20 mm y se menciona que longitudes mayores se relacionan con reducción de trabajabilidad (Ferreira da Costa et al., 2020).

### **2.7.2.3 Dispersión**

Se reporta que, en plantas tipo batch, se incrementa el tiempo de mezclado en seco 5–15 s para permitir dispersión de fibras en el agregado y que el mezclado en húmedo también se incrementa para recubrimiento con ligante (Targeted Overlay Pavement Solutions, 2022). Adicionalmente, se destaca que el proceso de mezclado y el tamaño son variables clave a optimizar en el desempeño de mezclas con fibras (Guo et al., 2023).

## **2.7.3 Efectos reportados en *Va*, *VMA*, *VFA* y en *Estabilidad/Flujo***

### **2.7.3.1 Estabilidad Marshall.**

En SMA con fibras de pseudotallo de banano, se reporta que la estabilidad Marshall aumenta respecto a la mezcla sin fibras, atribuyéndolo a la cohesión asociada a la acción del estabilizador al retener ligante; además, los grupos evaluados superaron un umbral mínimo de estabilidad citado por los autores para SMA (Ferreira da Costa et al., 2020).

En SMA con fibras naturales, se concluye que la incorporación de fibra incrementa la estabilidad (reportando aumentos relativos para cada fibra) y se asocia también a un aumento de la gravedad específica bulk y a un mejor control del drenado, con la salvedad de problemas de homogeneidad cuando la dosificación es alta (Venkatesh y Suvvari, 2018).

### **2.7.3.2 Flujo Marshall**

En la evaluación Marshall de SMA con fibras naturales, se obtiene que el comportamiento del flujo en función del porcentaje de ligante para mezclas convencional y con fibras, como parte del análisis comparativo junto con estabilidad (Venkatesh y Suvvari, 2018).

### **2.7.3.3 Vacíos de aire (Va) y Vacíos en el Agregado Mineral (VMA)**

En una mezcla con fibras naturales, se logra que los vacíos de aire disminuyan con la incorporación de fibra y se presentan valores comparativos entre mezcla convencional y mezclas con fibra; asimismo, se reporta el análisis de VMA/VFA en la determinación del contenido óptimo de ligante (Venkatesh y Suvvari, 2018).

## CAPÍTULO III: Metodología

### 3.1 Enfoque, tipo y diseño de investigación

La investigación tiene enfoque cuantitativo y de tipo experimental, se desarrolló en laboratorio, debido a que era necesario controlar las condiciones en las que se fabricaron y las briquetas, se midieron variables volumétricas y Marshall para evaluar que efecto tiene la fibra de pseudotallo de plátano en mezcla asfáltica para capa de rodadura.

El diseño de estudio se desarrolló en 2 etapas:

#### 1. **Determinación del contenido óptimo de asfalto (OAC) – mezcla control:**

Aquí se elaboraron y ensayaron briquetas con diferentes porcentajes de asfalto para definir el contenido de trabajo. En esta etapa se obtuvieron *Gmb* (bulk) y *Gmm* (Rice) para el cálculo volumétrico, también estabilidad y flujo Marshall.

#### 2. **Evaluación del efecto de la fibra – mezcla modificada:**

Una vez se encontró el contenido de asfalto, se fabricaron briquetas incorporando fibra en 0,3%, 0,4% y 0,5%, repitiendo los mismos ensayos para comparar el comportamiento frente a la mezcla control.

#### **Variables del estudio:**

- **Independientes:**
  - Porcentaje de asfalto (etapa 1).
  - Porcentaje de fibra (etapa 2).

- **Dependientes (respuestas):**
  - Volumétricas: *Gmb*, *Gmm* y, a partir de ellas, *Va*, *VMA* y *VFA*.
  - Marshall: estabilidad y flujo.
  
- **Condiciones controladas:**
  - Materiales y combinación granulométrica definida.
  - Procedimiento de mezclado, compactación y condiciones de ensayo, mantenidas constantes durante todo el proceso experimental.

### **3.2 Localización, obtención de materiales y lugar de ejecución**

El estudio se desarrolló en el cantón Portoviejo, provincia de Manabí, Ecuador. Los agregados pétreos y el ligante asfáltico AC-20 se obtuvieron de la cantera Uruzca, ubicada de igual manera en Portoviejo. La fabricación de briquetas y la ejecución de los ensayos se realizaron en un Laboratorio de Ciudad Rodrigo SA, el cual se encuentra operando en conjunto a la cantera, lo que permitió el manejo directo de los materiales y el control del proceso de preparación.

**Figura 2:**

Macrolocalización y microlocalización de la fuente de agregados y laboratorio



*Nota. Adaptado de Google Earth, (2026)*

### 3.3 Materiales empleados

#### 3.3.1 Agregados pétreos.

Se emplearon agregados provenientes de la cantera Uruzca (Portoviejo), clasificados por fracciones granulométricas que conformaron la mezcla asfáltica:

- Agregado grueso 3/4"
- Agregado grueso 3/8"
- Arena
- Cisco (fracción fina utilizada como parte del material mineral)

### 3.3.2 Ligante asfáltico (AC-20)

Se utilizó como ligante un asfalto AC-20, proveniente del mismo entorno operativo de la cantera/planta donde se ejecutó el programa experimental (Laboratorio Ciudad Rodrigo asociado a la operación de asfalto). Para este estudio, el ligante se consideró como el material base del diseño y fabricación de las briquetas, sin incorporar caracterización adicional por ficha técnica, debido a que no se contó con una hoja de propiedades específicas.

### 3.3.3 Pseudotallo de plátano

Se empleó fibra natural obtenida a partir de pseudotallo de plátano, recolectado en un sector de Portoviejo. La fibra fue extraída de manera manual, posteriormente se lavó para retirar impurezas superficiales y se sometió a secado al ambiente durante aproximadamente una semana, hasta alcanzar condición seca. Finalmente, se realizó el corte en segmentos de longitud aproximada de 1,5 a 2,0 cm, con el propósito de facilitar su incorporación y dispersión durante el mezclado. Esta fibra se utilizó como material modificador en porcentajes definidos respecto a la masa total de preparación por briketa, conforme al esquema experimental del estudio.

## 3.4 Equipos y herramientas de laboratorio

**Tabla 3:**

*Equipos y herramientas de laboratorio*

<b>EQUIPO / INSTRUMENTO</b>	<b>USO EN EL ESTUDIO</b>	<b>CARACTERÍSTICAS RELEVANTES</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
<b>HORNO (INDUSTRIAL)</b>	Secado de agregados para eliminar humedad antes del mezclado	Temperatura de trabajo hasta ~200 °C	—
<b>BALANZA DIGITAL</b>	Pesaje de agregados, ligante, fibra y especímenes	Resolución 0,01 g	Capacidad máxima: no registrada.
<b>JUEGO DE TAMICES</b>	Granulometría de agregados por fracción y	Incluye 3/4", 3/8" y mallas finas (p. ej., No. 4, 8, 50, 200)	Tamizado manual; limpieza con bandeja y cepillos.

	verificación de mezcla combinada		
<b>COCINA / QUEMADOR</b>	Calentamiento de agregados y ligante (apoyo a temperaturas de trabajo)	—	Usada como fuente de calor durante preparación.
<b>TERMÓMETROS (DIGITAL Y DE VÁSTAGO)</b>	Control de temperaturas de agregados, ligante y mezcla	Dos tipos: digital y de vástago	Control de temperatura durante fabricación.
<b>MOLDES MARSHALL</b>	Moldeo de briquetas	—	—
<b>EQUIPO DE COMPACTACIÓN MARSHALL (MANUAL)</b>	Compactación de briquetas	Compactación manual por golpes	—
<b>BAÑO MARÍA (CONTROLADO)</b>	Acondicionamiento térmico previo al ensayo Marshall	Control de temperatura incorporado	—
<b>PRENSA MARSHALL (ELÉCTRICA-HIDRÁULICA)</b>	Ensayo Marshall para obtención de estabilidad y flujo	—	Capacidad máxima: no registrada.
<b>EQUIPO RICE (GMM): FRASCO/PICNÓMETRO + BOMBA DE VACÍO</b>	Determinación de gravedad específica máxima teórica (Gmm)	Incluye bomba de vacío y manómetro	Ensayo con control de vacío por manómetro.
<b>DISPOSITIVO PARA PESAJE SUMERGIDO (GMB)</b>	Determinación de Gmb (bulk) mediante pesajes en aire y sumergido	Canastilla / gancho de inmersión	—

**Figura 3:**

*Equipo Rice (Gmm): frasco/picnómetro y bomba de vacío*



**Figura 4:**  
*Calentador a Baño María termostataado para acondicionamiento de briquetas*



**Figura 5:**  
*Prensa Marshall para determinación de estabilidad y flujo*



**Figura 6:**  
*Horno industrial para secado y calentamiento de agregados*



**Figura 7:**  
*Balanza digital de precisión para pesaje de materiales y especímenes*



**Figura 8:**  
*Compactador Marshall manual y moldes para elaboración de briquetas*



**Figura 9:**  
*Manómetro del sistema de vacío para ensayo Rice (control de presión/vacío)*



**Figura 10:**

*Juego de tamices para análisis granulométrico de agregados*



### **3.5 Ensayos de caracterización de materiales**

En esta etapa se caracterizaron los agregados empleados en la mezcla asfáltica mediante análisis granulométrico, determinación de gravedades específicas y absorción. La granulometría se obtuvo por fracción (ripio 3/4", ripio 3/8", cisco y arena) y se construyó la granulometría de la mezcla combinada a partir de las proporciones adoptadas. También se determinaron las gravedades específicas por fracción y se calcularon los valores ponderados de la mezcla de agregados, como valor para el diseño y el control volumétrico.

#### **3.5.1 Análisis granulométrico por fracción**

La granulometría se determinó para cada fracción de agregado (ripio 3/4", ripio 3/8", cisco y arena) mediante tamizado manual. El procedimiento consistió en secado del material para

eliminar humedad, tamizado por serie de mallas, registro del peso retenido por tamiz y cálculo del porcentaje retenido y del porcentaje que pasa acumulado.

**Tabla 4:**  
*Granulometría por fracción: ripio de 3/4"*

<b>GRANULOMETRIA</b>					
<b>RIPIO DE 3/4"</b>					
Tamiz No.	Abertura (mm)	P. Retenido parcial	P.Retenido acumulado	% Retenido acumulado	% Que pasa
1 1/2"	38.1	0.0	0.0	0.0	100.0
1"	25.4	0.0	0.0	0.0	100.0
3/4"	19	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2"	12.7	1835.0	1835.0	51.1	48.9
3/8"	9.5	1099.0	2934.0	81.6	18.4
No. 4	4.75	634.0	3568.0	99.3	0.7
No. 8	2.36	6.0	3574.0	99.4	0.6
No. 16	1.18	1.0	3575.0	99.5	0.5
No. 30	0.60	2.0	3577.0	99.5	0.5
No. 50	0.30	2.0	3579.0	99.6	0.4
No. 100	0.15	4.0	3583.0	99.7	0.3
No. 200	0.075	5.0	3588.0	99.8	0.2
Total		3594.0			

**Tabla 5:**  
*Granulometría por fracción: ripio de 3/8"*

<b>GRANULOMETRIA</b>					
<b>RIPIO DE 3/8"</b>					
Tamiz No.	Abertura (mm)	P. Retenido parcial	P.Retenido acumulado	% Retenido acumulado	% Que pasa
1 1/2"	38.1	0.0	0.0	0.0	100.0
1"	25.4	0.0	0.0	0.0	100.0
3/4"	19	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2"	12.7	0.0	0.0	0.0	100.0
3/8"	9.5	26.0	26.0	0.9	99.1
No. 4	4.75	2222.0	2248.0	78.3	21.7
No. 8	2.36	598.0	2846.0	99.1	0.9
No. 16	1.18	9.0	2855.0	99.4	0.6
No. 30	0.60	2.0	2857.0	99.5	0.5
No. 50	0.30	2.0	2859.0	99.5	0.5
No. 100	0.15	2.0	2861.0	99.6	0.4
No. 200	0.075	4.0	2865.0	99.8	0.2
Total		2872.0			

**Tabla 6:**  
*Granulometría por fracción: cisco*

<b>GRANULOMETRIA</b>					
<b>CISCO</b>					
Tamiz No.	Abertura (mm)	P. Retenido parcial	P.Retenido acumulado	% Retenido acumulado	% Que pasa
1 1/2"	38.1	0.0	0.0	0.0	100.0
1"	25.4	0.0	0.0	0.0	100.0
3/4"	19	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2"	12.7	0.0	0.0	0.0	100.0
3/8"	9.5	0.0	0.0	0.0	100.0
No. 4	4.75	0.0	0.0	0.0	100.0
No. 8	2.36	133.0	133.0	16.6	83.4
No. 16	1.18	208.0	341.0	42.6	57.4
No. 30	0.60	139.0	480.0	60.0	40.0
No. 50	0.30	105.0	585.0	73.1	26.9
No. 100	0.15	68.0	653.0	81.6	18.4
No. 200	0.075	36.0	689.0	86.1	13.9
Total		800.0			

**Tabla 7:**  
*Granulometría por fracción: arena de río*

<b>GRANULOMETRIA</b>					
<b>ARENA DE RIO</b>					
Tamiz No.	Abertura (mm)	P. Retenido parcial	P.Retenido acumulado	% Retenido acumulado	% Que pasa
1 1/2"	38.1	0.0	0.0	0.0	100.0
1"	25.4	0.0	0.0	0.0	100.0
3/4"	19	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2"	12.7	26.0	26.0	3.3	96.8
3/8"	9.5	4.0	30.0	3.8	96.3
No. 4	4.75	60.0	90.0	11.3	88.8
No. 8	2.36	136.0	226.0	28.3	71.8
No. 16	1.18	99.0	325.0	40.6	59.4
No. 30	0.60	97.0	422.0	52.8	47.3
No. 50	0.30	186.0	608.0	76.0	24.0
No. 100	0.15	108.0	716.0	89.5	10.5
No. 200	0.075	32.0	748.0	93.5	6.5
Total		800.0			

**Figura 11:**

*Tamizado manual para determinación granulométrica de los agregados*



### ***3.5.2 Gravedad específica de agregados por fracción***

Se determinaron las gravedades específicas del agregado por fracción, incluyendo bulk, SSD, aparente y absorción, registrando las masas requeridas según el tipo de agregado. Para los agregados gruesos se consideraron los pesos en condición seca, SSD y sumergida; mientras que para los agregados finos se empleó picnómetro para la obtención de los valores correspondientes.

**Tabla 8:**  
*Gravedades específicas y absorción por fracción*

<b>GRAVEDADES ESPECÍFICAS:</b>				
GRAVEDAD ESPECÍFICA	RIPIO DE 3/4"	RIPIO DE 3/8"	CISCO	ARENA
BULK MASA	2.515	2.480	2.467	2.540
SSS	2.610	2.588	2.543	2.597
APARENTE	2.778	2.779	2.671	2.694
ABSORCION	3.77	4.34	3.09	2.25

<b>RIPIO DE 3/4"</b>		
A: Peso seco de la muestra en aire, ver tabla	4,818.5	g
B: Peso en estado sss de la muestra en aire	5,000.0	g
C: Peso en agua de la muestra saturada	3,084.2	g

<b>RIPIO DE 3/8"</b>		
A: Peso seco de la muestra en aire, ver tabla	2,875.3	g
B: Peso en estado sss de la muestra en aire	3,000.0	g
C: Peso en agua de la muestra saturada	1,840.6	g

<b>CISCO</b>		
A: Peso seco de la muestra en aire	485.00	gr
B: Peso del picnómetro lleno con agua	698.70	gr
S: Peso en estado sss de la muestra en aire	500.00	gr
C: Peso del picnómetro mas muestra y mas agua	1,002.10	gr

<b>ARENA DE RIO</b>		
A: Peso seco de la muestra en aire	489.00	gr
B: Peso del picnómetro lleno con agua	660.40	gr
S: Peso en estado sss de la muestra en aire	500.00	gr
C: Peso del picnómetro mas muestra y mas agua	967.90	gr

**Figura 12:**

*Eliminación de aire atrapado en el picnómetro para gravedad específica*



### ***3.5.3 Gravedad específica equivalente de la mezcla de agregados***

Con los valores de gravedad específica por fracción y las proporciones de combinación adoptadas, se calcularon las gravedades específicas equivalentes de la mezcla de agregados (bulk y aparente) y su absorción ponderada, como parámetros representativos del conjunto mineral usados en el diseño.

**Tabla 9:**

*Gravedad específica bulk y aparente de la mezcla de agregados, y absorción ponderada*

<b>Gravedad Específica Bulk de la mezcla de agregados</b>									
$G_{sb} =$	$\frac{18}{2.515}$	+	$\frac{29}{2.480}$	+	$\frac{34}{2.467}$	+	$\frac{19}{2.540}$	=	2.493
<b>Gravedad Específica Aparente de la mezcla de agregados</b>									
$G_{sa} =$	$\frac{18}{2.778}$	+	$\frac{29}{2.779}$	+	$\frac{34}{2.671}$	+	$\frac{19}{2.694}$	=	2.725
<b>% Absorción de la mezcla de agregados</b>									
% Absorción =	$\frac{18}{3.767}$	+	$\frac{29}{4.337}$	+	$\frac{34}{3.093}$	+	$\frac{19}{2.249}$	=	3.24

### ***3.5.4 Granulometría de la mezcla combinada y verificación con límites de especificación***

A partir de los resultados granulométricos por fracción y de los porcentajes de combinación definidos para cada agregado, se realizó la granulometría de la mezcla combinada, calculando el porcentaje que pasa por tamiz de la mezcla como combinación ponderada. La curva resultante se comparó con los límites de especificación (faja mínima y máxima) para verificar el cumplimiento granulométrico de la mezcla de agregados.

**Tabla 10:**

Mezcla de agregados: porcentajes de combinación y granulometría combinada.

AGREGADOS		%
RIPIO DE 3/4"		18
RIPIO DE 3/8"		29
CISCO		34
ARENA DE RIO		19
TOTAL		100

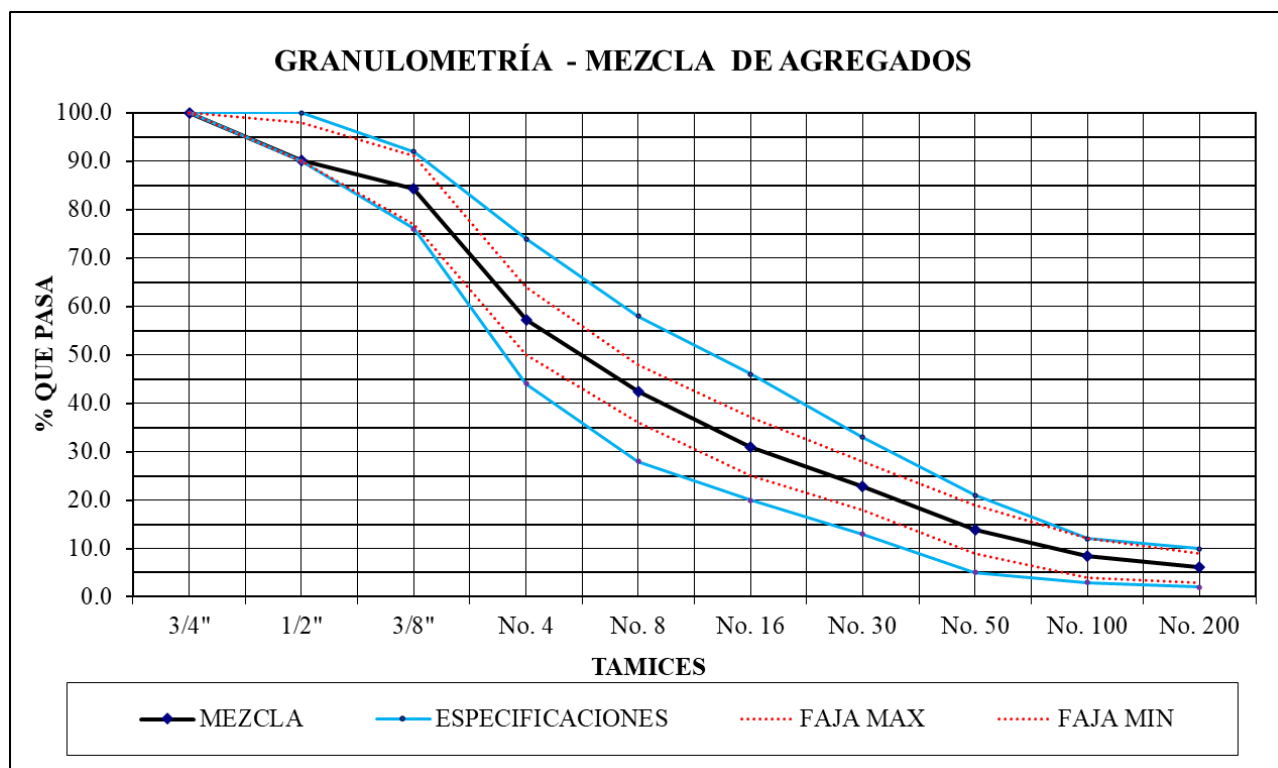
FILLER / BETUN	
1.16	

MEZCLA DE AGREGADOS										
TAMICES	TAMAÑOS	RIPI 1/2	RIPI 3/8	CISCO	ARENA	MEZCLA	MEDIA	ESPECIFICACIONES		TOLERANCIAS
3/4"	19.00	100.00	100.0	100.0	100.0	100.0	100	100	100	± 8 %
1/2"	12.50	48.94	100.0	100.0	96.8	90.2	95	90	100	± 8%
3/8"	9.50	18.36	99.1	100.0	96.3	84.3				
No. 4	4.75	0.72	21.73	100.00	88.75	57.3	59	44	74	± 7%.
No. 8	2.36	0.56	0.91	83.38	71.75	42.3	43	28	58	± 6%
No. 16	1.18	0.53	0.59	57.38	59.38	31.1				
No. 30	0.60	0.47	0.52	40.00	47.25	22.8				
No. 50	0.30	0.42	0.45	26.88	24.00	13.9	13	5	21	± 5%.
No. 100	0.15	0.31	0.38	18.38	10.50	8.4				
No. 200	0.08	0.17	0.24	13.88	6.50	6.1	6	2	10	± 3%

**Figura 13:**

Curva granulométrica de la mezcla de agregados y faja de especificación (mínima y máxima)



### **3.6 Diseño de la mezcla asfáltica de control por método Marshall**

#### ***3.6.1 Parámetros de diseño y condiciones de fabricación***

El diseño de la mezcla asfáltica de control se realizó mediante el método Marshall, estableciendo condiciones de fabricación y compactación constantes durante toda la etapa de determinación del contenido óptimo de asfalto (OAC). La compactación se realizó con 75 golpes por cara, con el criterio de representar condiciones de tránsito muy pesado. Para la preparación de las briquetas se controlaron temperaturas de trabajo, calentando los agregados (sin ligante) entre 130–140 °C, el ligante asfáltico AC-20 entre 140–150 °C, y realizando el mezclado y la compactación de la mezcla dentro del rango de 130–135 °C. Por practicidad, se trabajó con una masa total de preparación de 1500 g por briketa, con el objetivo de garantizar el llenado completo del molde y una compactación uniforme del espécimen.

#### **Resumen:**

- Número de golpes Marshall: 75 por cara.
- Temperatura de agregados (sin AC-20): 130–140 °C.
- Temperatura del asfalto AC-20: 140–150 °C.
- Temperatura de mezclado/compactación: 130–135 °C.
- Masa total de preparación por briketa: 1500 g.

**Figura 14:***Registro fotográfico del control de temperatura*

### 3.6.2 Dosificación y combinación de agregados

La mezcla de control se definió a partir de la combinación de cuatro fracciones de agregado: ripio 3/4", ripio 3/8", cisco y arena de río, en proporciones constantes para la conformación de la mezcla mineral. La combinación adoptada fue: 18% ripio 3/4", 29% ripio 3/8", 34% cisco y 19% arena, aplicada sobre la masa total de agregados de cada briqueta. Para la dosificación por briqueta se consideró una masa total de preparación  $M_T$  y un contenido de asfalto  $P_b$  (en %). Primero se calculó la masa de ligante como  $M_b = \frac{P_b}{100} \cdot M_T$ . Posteriormente, la masa restante correspondió a agregados:  $M_{agg} = M_T - M_b$ . Finalmente, la masa total de agregados se distribuyó entre las fracciones según los porcentajes de combinación definidos, obteniendo las masas individuales requeridas para el pesaje y el mezclado de cada briqueta.

**Tabla 11:**

*Plantilla de cálculo de dosificación por briqueta para mezcla de control (sin fibra)*

<i>Parámetro</i>	<i>Expresión</i>	<i>Valor</i>
<i>Masa total por briqueta</i>	$M_T$	1500 g
<i>Contenido de asfalto</i>	$P_b$	(variable en etapa OAC)
<i>Masa de asfalto</i>	$M_b = \frac{P_b}{100} \cdot M_T$	—
<i>Masa total de agregados</i>	$M_{agg} = M_T - M_b$	—
<i>Ripio 3/4"</i>	$M_{3/4} = 0,18 \cdot M_{agg}$	—
<i>Ripio 3/8"</i>	$M_{3/8} = 0,29 \cdot M_{agg}$	—
<i>Cisco</i>	$M_{cisco} = 0,34 \cdot M_{agg}$	—
<i>Arena</i>	$M_{arena} = 0,19 \cdot M_{agg}$	—

### 3.7 Determinación del Contenido Óptimo de Asfalto (OAC) – Mezcla control

#### 3.7.1 Contenidos evaluados y número de especímenes

Para la determinación del contenido óptimo de asfalto (OAC) se elaboraron briquetas de mezcla control (sin fibra) variando el contenido de ligante. Los contenidos de asfalto probados fueron 5,5%, 6,0%, 6,5%, 7,0% y 7,5%. Para cada contenido se fabricaron tres (3) briquetas, manteniendo constantes la combinación granulométrica de agregados (18–29–34–19), la masa total de preparación por briqueta (1500 g) y las condiciones de fabricación y compactación.

### 3.7.2 Elaboración de briquetas

**Tabla 12:**

*Cálculo de materiales para 1 briketa de control ( $M_T = 1500g$ )*

**% AC-20 = 5,50%**

**% AC-20 = 6,0%**

Concepto	Valor
$M_T$ (g)	1500,00
$P_b$ (%)	5,50
$M_b$ Asfalto (g)	82,50
$M_{agg}$ Agregados (g)	1417,50
$M_{3/4}$ (g)	255,15
$M_{3/8}$ (g)	411,08
$M_{cisco}$ (g)	481,95
$M_{arena}$ (g)	269,33
$\Sigma$ agregados (g)	1417,50
$\Sigma$ total (g)	1500,00

Concepto	Valor
$M_T$ (g)	1500
$P_b$ (%)	6
$M_b$ Asfalto (g)	90
$M_{agg}$ Agregados (g)	1410
$M_{3/4}$ (g)	253,8
$M_{3/8}$ (g)	408,9
$M_{cisco}$ (g)	479,4
$M_{arena}$ (g)	267,9
$\Sigma$ agregados (g)	1410
$\Sigma$ total (g)	1500

% AC-20 = 6,50%

Concepto	Valor
$M_T$ (g)	1500
$P_b$ (%)	6,5
$M_b$ Asfalto (g)	97,5
$M_{agg}$ Agregados (g)	1402,5
$M_{3/4}$ (g)	252,45
$M_{3/8}$ (g)	406,73
$M_{cisco}$ (g)	476,85
$M_{arena}$ (g)	266,48
$\Sigma$ agregados (g)	1402,5
$\Sigma$ total (g)	1500

% AC-20 = 7,0%

Concepto	Valor
$M_T$ (g)	1500
$P_b$ (%)	7
$M_b$ Asfalto (g)	105
$M_{agg}$ Agregados (g)	1395
$M_{3/4}$ (g)	251,1
$M_{3/8}$ (g)	404,55
$M_{cisco}$ (g)	474,3
$M_{arena}$ (g)	265,05
$\Sigma$ agregados (g)	1395
$\Sigma$ total (g)	1500

**% AC-20 = 7,50%**

Concepto	Valor
$M_T$ (g)	1500
$P_b$ (%)	7,5
$M_b$ Asfalto (g)	112,5
$M_{agg}$ Agregados (g)	1387,5
$M_{3/4}$ (g)	249,75
$M_{3/8}$ (g)	402,38
$M_{cisco}$ (g)	471,75
$M_{arena}$ (g)	263,63
$\Sigma$ agregados (g)	1387.5
$\Sigma$ total (g)	1500

**Comprobación (1 briqueta,  $M_T = 1500$ g)**

**Para 5,50%**

1.  $M_b = 0,055 \times 1500 = 82,5$  g
2.  $M_{agg} = 1500 - 82,5 = 1417,5$  g

3.  $M_{3/4} = 0,18 \times 1417,5 = 255,15 \text{ g}$
4.  $M_{3/8} = 0,29 \times 1417,5 = 411,075 \approx 411,08 \text{ g}$
5.  $M_{cisco} = 0,34 \times 1417,5 = 481,95 \text{ g}$
6.  $M_{arena} = 0,19 \times 1417,5 = 269,325 \approx 269,33 \text{ g}$
7.  $\Sigma \text{ agregados y asfalto: } 1417,50 + 82,50 = 1500,00 \text{ g}$

**Para 6,00%**

1.  $M_b = 0,06 \times 1500 = 90,00$
2.  $M_{agg} = 1500 - 90 = 1410,00$
3.  $M_{3/4} = 0,18 \times 1410 = 253,80$
4.  $M_{3/8} = 0,29 \times 1410 = 408,90$
5.  $M_{cisco} = 0,34 \times 1410 = 479,40$
6.  $M_{arena} = 0,19 \times 1410 = 267,90$
7.  $\Sigma \text{ agregados y asfalto} = 1410,00 + 90,00 = 1500,00 \text{ g}$

**Para 6,50%**

1.  $M_b = 0,065 \times 1500 = 97,50$
2.  $M_{agg} = 1500 - 97,50 = 1402,50$
3.  $M_{3/4} = 0,18 \times 1402,5 = 252,45$
4.  $M_{3/8} = 0,29 \times 1402,5 = 406,725 \approx 406,73$

5.  $M_{cisco} = 0,34 \times 1402,5 = 476,85$
6.  $M_{arena} = 0,19 \times 1402,5 = 266,475 \approx 266,48$
7.  $\Sigma$  agregados y asfalto:  $1402,50 + 97,50 = 1500,00$

**Para 7,00%**

1.  $M_b = 0,07 \times 1500 = 105,00$
2.  $M_{agg} = 1500 - 105 = 1395,00$
3.  $M_{3/4} = 0,18 \times 1395 = 251,10$
4.  $M_{3/8} = 0,29 \times 1395 = 404,55$
5.  $M_{cisco} = 0,34 \times 1395 = 474,30$
6.  $M_{arena} = 0,19 \times 1395 = 265,05$
7.  $\Sigma$  agregados y asfalto:  $1395,00 + 105,00 = 1500,00$

**Para 7,50%**

1.  $M_b = 0,075 \times 1500 = 112,50$
2.  $M_{agg} = 1500 - 112,5 = 1387,50$
3.  $M_{3/4} = 0,18 \times 1387,5 = 249,75$
4.  $M_{3/8} = 0,29 \times 1387,5 = 402,375 \approx 402,38$
5.  $M_{cisco} = 0,34 \times 1387,5 = 471,75$
6.  $M_{arena} = 0,19 \times 1387,5 = 263,625 \approx 263,63$

7.  $\Sigma$  agregados y asfalto:  $1387,50 + 112,50 = 1500,00$

### **Procedimiento**

1. Secado de agregados: las fracciones de agregado se secaron en horno para eliminar humedad.
2. Pre calentamiento de agregados: se calentaron los agregados (sin ligante) entre 130–140 °C.
3. Calentamiento del ligante: el asfalto AC-20 se calentó entre 140–150 °C.
4. Dosificación: se pesaron las masas de cada fracción y del ligante según la Tabla 3.7-1, para el contenido de asfalto correspondiente.
5. Mezclado en caliente: se mezclaron primero las fracciones minerales y luego se incorporó el ligante hasta obtener recubrimiento uniforme.
6. Moldeo: la mezcla se colocó en el molde Marshall, procurando llenado y distribución homogénea.
7. Compactación: se compactó a 130–135 °C aplicando 75 golpes por cara.
8. Enfriamiento y desmoldeo: se dejó enfriar el espécimen, se desmoldó y se rotuló con el código correspondiente (contenido de asfalto y número de briqueta).

**Figura 15:**  
*Preparación y mezclado en caliente de briquetas de control*



**Figura 16:**  
*Compactación Marshall (75 golpes por cara) en briquetas de control*



### 3.7.3 Ensayos en briquetas y datos registrados

Una vez fabricadas las briquetas de control, para cada contenido de asfalto se realizaron ensayos para obtener los parámetros volumétricos y la respuesta Marshall. En cada briqueta se registraron las masas requeridas para el cálculo de  $G_{mb}$  (bulk), se determinó  $G_{mm}$  (Rice) sobre mezcla suelta, y se ejecutó el ensayo Marshall para obtener estabilidad y flujo.

#### Datos registrados

- **Para  $G_{mb}$  (bulk):**
  - Masa seca del espécimen.
  - Masa del espécimen en aire en condición superficialmente seca (SSD)
  - Masa del espécimen sumergido en agua.

#### Figura 17:

*Determinación de  $G_{mb}$  (bulk): pesaje sumergido de briquetas.*



- **Para Gmm (Rice):**
  - Registros del frasco/picnómetro Rice, vacío aplicado y lectura/manómetro

**Figura 18:**

*Ensayo Rice (Gmm) con bomba de vacío y manómetro.*



- **Para Marshall:**
  - Acondicionamiento en baño María.
  - Lecturas de estabilidad (carga máxima) y flujo (deformación asociada) en prensa Marshall.

**Figura 19:**

*Acondicionamiento en baño María y ensayo Marshall en prensa (estabilidad y flujo).*

**Figura 20:**

*Prensa Marshall para rotura de briquetas*



### ***3.7.4 Procesamiento de datos volumétricos y criterio para seleccionar OAC***

Con los valores calculados de Gmb (bulk) y Gmm (Rice) se calcularon los parámetros volumétricos de la mezcla, siendo estos Va (vacíos de aire), VMA (vacíos en el agregado mineral) y VFA (vacíos llenos de asfalto), para cada briqueta con los diferentes contenidos de asfalto ensayado. Luego los resultados se organizaron en tablas y se construyeron curvas en función del contenido de asfalto. El contenido óptimo de asfalto (OAC) se seleccionó aplicando el criterio de la curva de Va, identificando el porcentaje de asfalto correspondiente a 4% de vacíos de aire, y adoptando el contenido de trabajo utilizado posteriormente en la fabricación de la mezcla control y de las briquetas con fibra (desarrollado en el CAPÍTULO IV: Resultados y análisis).

## **3.8 Preparación de la fibra y método de incorporación**

### ***3.8.1 Preparación***

La fibra de pseudotallo de plátano se obtuvo mediante extracción manual a partir de material recolectado en un sector de Portoviejo. La fibra fue lavada para remover impurezas superficiales y se sometió a secado durante aproximadamente una semana hasta alcanzar condición seca. Se realizó el corte de la fibra con una longitud aproximada de 1,5 a 2,0 cm, quedando lista para su incorporación en la fabricación de las briquetas.

**Figura 21:**

*Extracción, lavado y secado de fibra de pseudotallo de plátano*



### **3.8.2 Base de cálculo del % de fibra y método de adición**

El porcentaje de fibra se definió con base en la masa total de preparación por briqueta, establecida como  $M_T = 1500$  g. La incorporación de fibra se realizó mediante el método de adición, es decir, no se redujo la masa de agregados ni la masa de ligante asfáltico en la mezcla base; en su lugar, la fibra se agregó a la dosificación correspondiente a la briqueta, manteniendo constante el diseño de agregados y el contenido de asfalto adoptado para la mezcla.

**Tabla 13:**  
Bases de cálculo del % de fibra

<i>Parámetro</i>	<i>Expresión</i>	<b>0,3%</b>	<b>0,4%</b>	<b>0,5%</b>
<i>Masa total base por briqueta</i>	$M_T$	1500 g	1500 g	1500 g
<i>Contenido de fibra</i>	$P_f$	0,3%	0,4%	0,5%
<i>Masa de fibra</i>	$M_f = \frac{P_f}{100} \cdot M_T$	4,50 g	6,00 g	7,50 g
<i>Masa final por briqueta</i>	$M_{final} = M_T + M_f$	1504,50 g	1506,00 g	1507,50 g

**Figura 22:**  
Pesaje e incorporación de fibra por método de adición (0,3%–0,5%)



### 3.9 Elaboración de briquetas con fibra

#### 3.9.1 Matriz experimental

Para evaluar el efecto de la fibra de pseudotallo de plátano en la mezcla asfáltica, se elaboraron briquetas modificadas incorporando fibra en tres niveles de dosificación: 0,3%, 0,4% y 0,5%, calculados sobre la masa total base de preparación por briqueta ( $M_T = 1500$  g) mediante

el método de adición. Para cada nivel de fibra se fabricaron dos briquetas, manteniendo constante el contenido de asfalto adoptado y la combinación de agregados ya definida. Los resultados se compararon con la mezcla de control (0% fibra) elaborada con el mismo contenido de asfalto y bajo las mismas condiciones de fabricación.

### ***3.9.2 Procedimiento de mezclado y compactación***

1. **Secado y calentamiento de agregados:** se secaron los agregados para eliminar humedad y se calentaron (sin ligante) entre 130–140 °C.
2. **Calentamiento del ligante:** el asfalto AC-20 se calentó entre 140–150 °C.
3. **Dosificación:** se pesaron las fracciones de agregados conforme a la combinación 18–29–34–19, el contenido de asfalto adoptado y el contenido de fibra correspondiente (0,3%, 0,4% o 0,5%).
4. **Mezclado inicial:** se mezclaron las fracciones minerales hasta lograr una distribución uniforme.
5. **Incorporación del ligante:** se añadió el asfalto caliente y se mezcló hasta lograr recubrimiento homogéneo del agregado.
6. **Incorporación de la fibra:** se agregó la fibra previamente preparada (seca y cortada a 1,5–2,0 cm) y se continuó el mezclado hasta evidenciar una distribución uniforme dentro de la mezcla.
7. **Moldeo:** la mezcla se colocó en el molde Marshall, cuidando el llenado completo y la distribución homogénea.
8. **Compactación:** se compactó a 130–135 °C aplicando 75 golpes por cara, manteniendo el mismo procedimiento empleado en la mezcla de control.

9. **Enfriamiento, desmoldeo y rotulación:** se dejó enfriar el espécimen, se desmoldó y se rotuló indicando el porcentaje de fibra y el número de briqueta.

### 3.10 Ensayos en briquetas con fibra

Las briquetas modificadas con fibra fueron evaluadas con la misma metodología de ensayos usados para la mezcla de control, con el fin de asegurar comparabilidad entre tratamientos. Para cada briqueta se determinó la gravedad específica bulk ( $G_{mb}$ ), la gravedad específica máxima teórica ( $G_{mm}$ , Rice) y se ejecutó el ensayo Marshall para obtener estabilidad y flujo, manteniendo constantes las condiciones de acondicionamiento y ensayo.

**Figura 23:**

*Determinación de  $G_{mb}$  (bulk) en briquetas con fibra*



**Figura 24:**

*Ensayo Rice ( $G_{mm}$ ) en mezcla con fibra*



**Figura 25:**

*Ensayo Marshall en briquetas con fibra (baño María y prensa)*



### **3.11 Criterios de comparación y tratamiento de datos**

El tratamiento de datos se orientó a comparar el comportamiento de la mezcla modificada con fibra respecto a la mezcla de control, empleando como base los resultados experimentales obtenidos para cada briqueta. Para cada nivel de fibra se calcularon valores representativos por tratamiento, con el propósito de identificar variaciones asociadas a la incorporación de fibra bajo condiciones de fabricación equivalentes.

En particular, se compararon los parámetros Marshall (estabilidad y flujo) y los parámetros volumétricos ( $V_a$ ,  $VMA$  y  $VFA$ , calculados a partir de  $G_{mb}$  y  $G_{mm}$ ) entre la mezcla control y los tratamientos con 0,3%, 0,4% y 0,5% de fibra. La presentación, análisis e interpretación de los resultados se desarrollan en el CAPÍTULO IV: Resultados y análisis.

## CAPÍTULO IV: Resultados y análisis

### 4.1 Resultados del diseño Marshall – Mezcla control

#### 4.1.1 Resultados del ensayo Rice (Gmm) vs % de asfalto

**Tabla 14:**

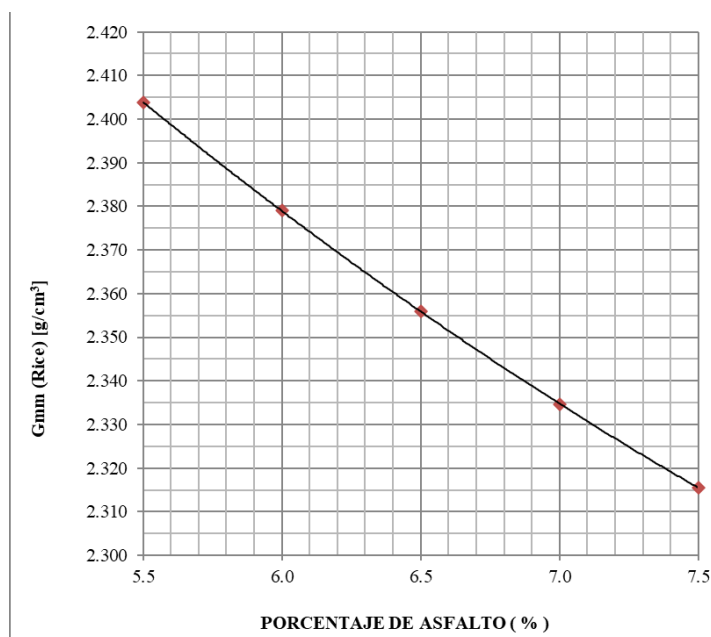
*Ensayo Rice (Gmm) en función del porcentaje de asfalto y mezcla control*

ENSAYO RICE						COMPROBACION
% Asfalto	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	6.70
Peso estándar	7321	7321	7321	7321	7321	7321
Peso + muestra	8197	8190.5	8184.3	8178.5	8173.2	8182.4
Peso Muestra	1500	1500	1500	1500	1500	1500
<b>Rice</b>	<b>2.404</b>	<b>2.379</b>	<b>2.356</b>	<b>2.335</b>	<b>2.316</b>	<b>2.349</b>

*Nota. Gmb y Gmm en g/cm<sup>3</sup>; Va, VMA y VFA en %. Flujo en 0,01". Estabilidad corregida según procedimiento Marshall aplicado en el laboratorio.*

**Figura 26:**

*Relación entre la Gravedad Específica Máxima Teórica (Rice) y el contenido de asfalto en mezcla de control*



*Nota. Elaboración propia a partir de los resultados de la mezcla control usados para la determinación del OAC.*

#### 4.1.2 Resultados volumétricos y Marshall por contenido de asfalto

**Tabla 15:**

Propiedades volumétricas y Marshall de la mezcla control para la determinación del OAC

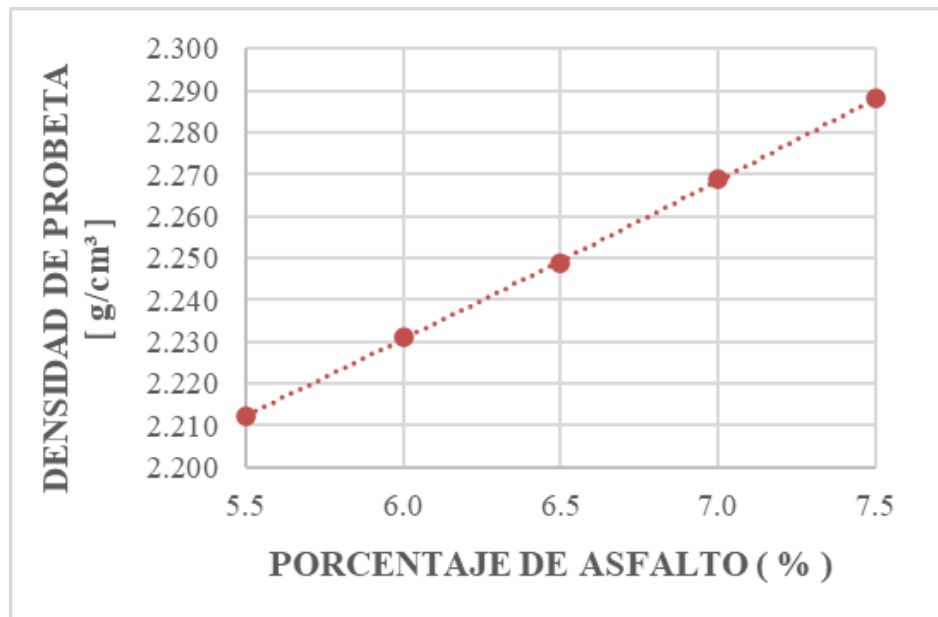
PROPIEDADES DE LA MEZCLA ASFALTICA CARPETA DE 1/2"																						
Peso específico del asfalto Gb =					1.015		K Anillo =					9.4283										
MUESTRA	MATERIAL	DOSIFIC. %	P.E. BULK, AGREGADO GSB	P.E. EFECTIVO AGREGADO GSE	% C.A. ABS. POR AGREGADO	PESO MUESTRA			VOLUMEN G.C.	DENSIDAD		% EN VOLUMEN			V.A.M. %	V.A.F. %	% C.A. EFECT. EN LA MEZCLA	FACTOR CORREC.	ESTABILIDAD			FLUJO
						AIRE SECO	AIRE S.S.S	AGUA S.S.S		PROBETA BULK	RICE	AGREG.	VACIOS TOTAL	C.A.					MEDIDA KG	LECTURA DIAL	LBS. CORREG.	
1						1185.8	1186.0	650.5	535.5	2.214							0.96	3347.05	355	3213	11	
2	% C.A	5.50				1154.4	1158.3	636.4	521.9	2.212							1.00	3252.76	345	3253	11	
3						1148.2	1152.2	632.8	519.4	2.211							1.00	3158.48	335	3158	11	
						2.493	2.612	1.85		2.212	2.404	83.86	7.97	8.17	16.14	50.64	3.75			3.208	11	
1						1143.8	1147.7	634.5	513.2	2.229							1.00	3658.18	388	3658	11	
2	% C.A	6.00				1143.3	1146.3	633.4	512.9	2.229							1.00	3677.04	390	3677	13	
3						1128.0	1131.2	626.4	504.8	2.235							1.04	3535.61	375	3677	12	
						2.493	2.602	1.71		2.231	2.379	84.12	6.22	9.66	15.88	60.81	4.39			3.671	12	
4						1163.2	1165.1	647.4	517.7	2.247							1.00	3959.89	420	3960	13	
5	% C.A	6.50				1140.3	1142.3	635.2	507.1	2.249							1.04	3790.18	402	3942	13	
6						1138.3	1138.6	633.0	505.6	2.251							1.04	3752.46	398	3903	12	
						2.493	2.594	1.59		2.249	2.356	84.35	4.54	11.11	15.65	71.00	5.02			3.935	13	
7						1163.0	1164.1	651.9	512.2	2.271							1.00	4035.31	428	4035	14	
8	% C.A	7.00				1161.9	1162.8	650.9	511.9	2.270							1.00	4101.31	435	4101	13	
9						1125.0	1126.5	630.0	496.5	2.266							1.04	3959.89	420	4118	14	
						2.493	2.588	1.49		2.269	2.335	84.63	2.82	12.54	15.37	81.63	5.61			4.085	14	
10						1162.7	1163.3	654.4	508.9	2.285							1.04	3865.6	410	4020	15	
11	% C.A	7.50				1148.2	1149.1	646.9	502.2	2.286							1.04	3941.03	418	4099	15	
12						1143.9	1144.7	645.9	498.8	2.293							1.04	4054.17	430	4216	14	
						2.493	2.584	1.43		2.288	2.316	84.90	1.18	13.92	15.10	92.16	6.17			4.112	15	
PUNTO DE COMPROBACION																						
1						1139.4	1141.1	634.9	506.2	2.251							1.04	3582.75	380	3726	13	
2	% C.A	6.70				1137.1	1139.9	635.7	504.2	2.255							1.04	3535.61	375	3677	15	
3						1143.6	1145.5	638.1	507.4	2.254							1.04	3431.9	364	3569	12	
						2.493	2.594	1.58		2.254	2.349	84.37	4.03	11.61	15.63	74.2	5.23			3.657	13	

Nota. Gmb y Gmm en g/cm<sup>3</sup>; Va, VMA y VFA en %. Flujo en 0,01". Estabilidad corregida según procedimiento Marshall aplicado en el laboratorio.

### 4.1.3 Curvas Marshall

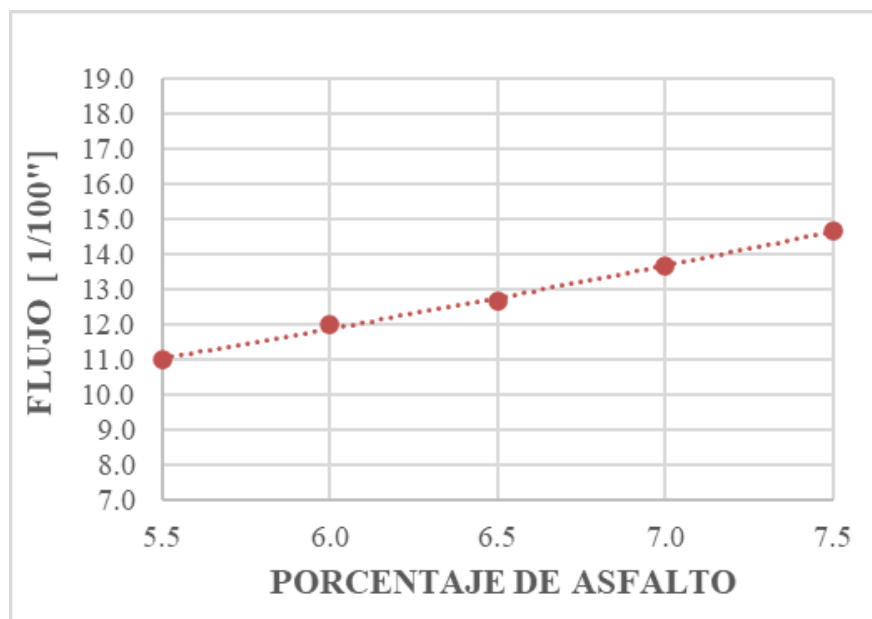
**Figura 27:**

*Curva Marshall de densidad bulk (Gmb) en función del contenido de asfalto (mezcla control)*



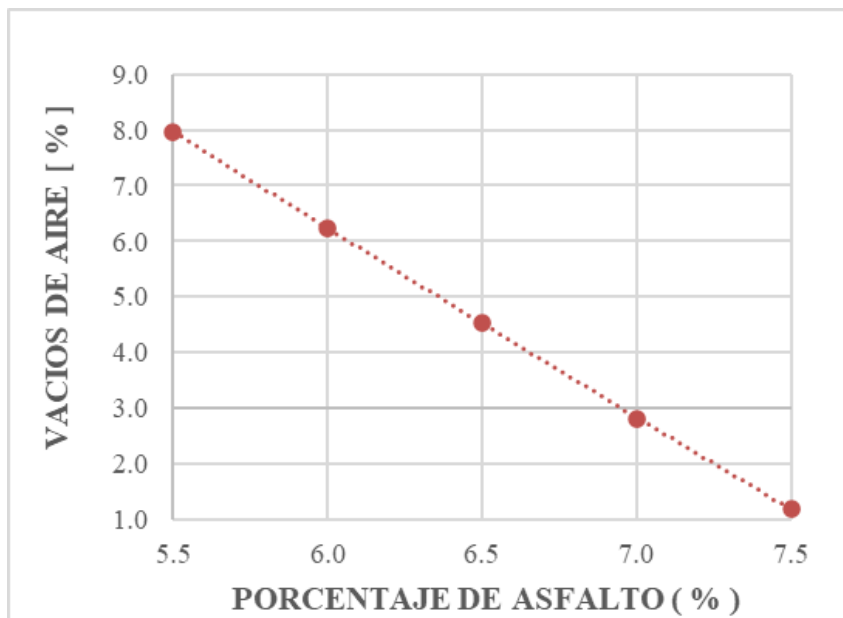
**Figura 28:**

*Curva Marshall del flujo en función del contenido de asfalto (mezcla control)*

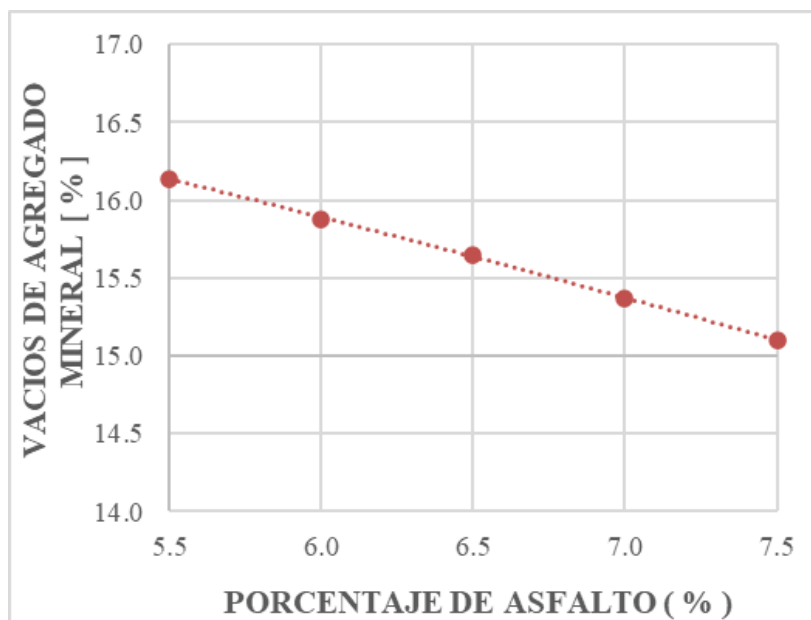


**Figura 29:**

Curva Marshall de vacíos de aire ( $V_a$ ) en función del contenido de asfalto (mezcla control)

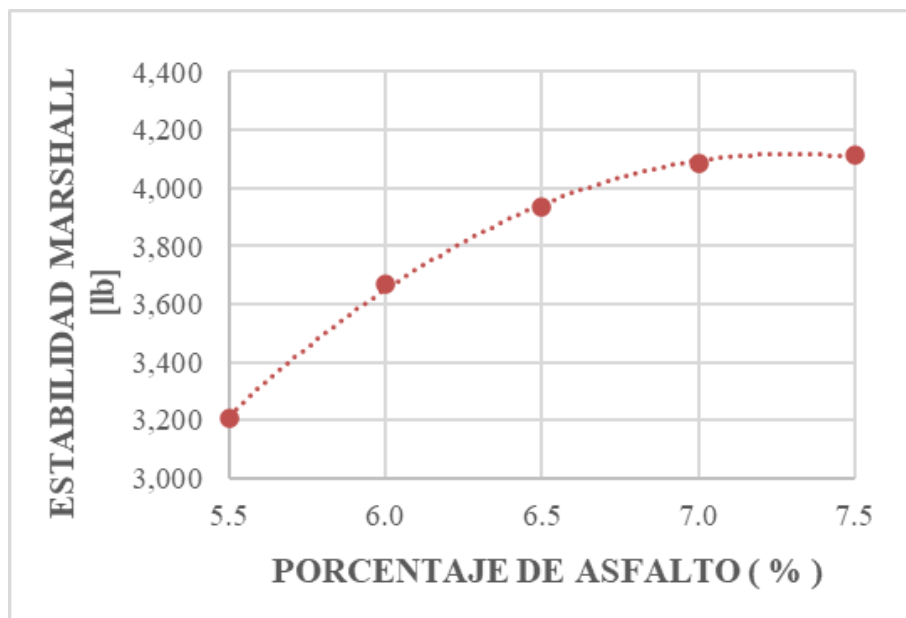
**Figura 30:**

Curva Marshall de vacíos en el agregado mineral (VMA) en función del contenido de asfalto (mezcla control)

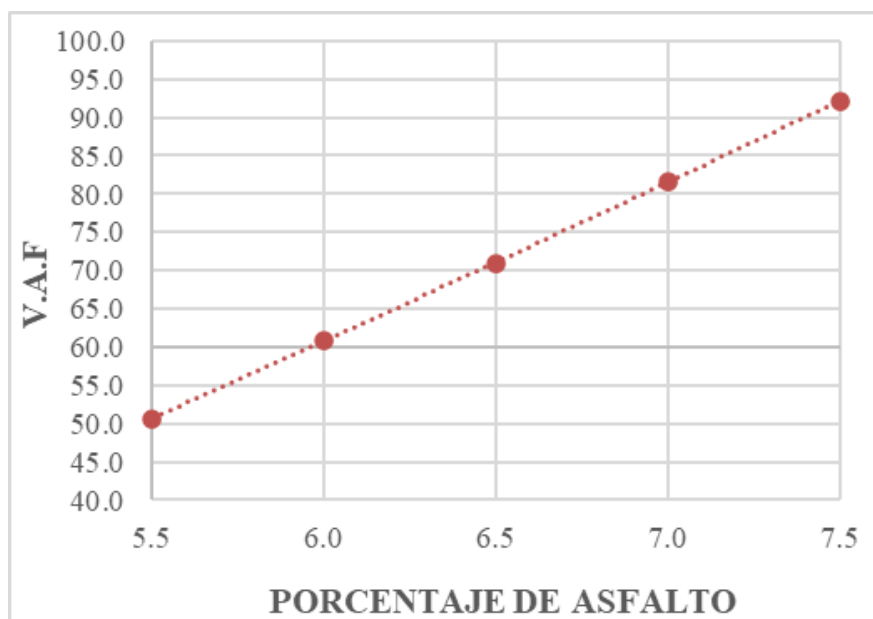


**Figura 31:**

Curva Marshall de estabilidad (carga máxima) en función del contenido de asfalto (mezcla control)

**Figura 32:**

Curva Marshall de vacíos llenos de asfalto (VFA) en función del contenido de asfalto (mezcla control)



**Tabla 16:**  
*Determinación del contenido óptimo de asfalto (OAC)*

<b>ÓPTIMO DE ASFALTO</b>		<b>6.70</b>	<b>%</b>
<b>DENSIDAD BULK</b>		<b>2.257</b>	<b>gr/cm<sup>3</sup></b>
<b>COMPROBACIONES</b>		<b>ESPECIFICACIONES</b>	
ESTABILIDAD	<b>4,009</b>	<b>lb.</b>	<b>&lt; 2200 lb.</b>
FLUJO	<b>13.06</b>	<b>0,01"</b>	<b>8 - 14</b>
V.A.M	<b>15.54</b>	<b>%</b>	<b>&lt; 14 %</b>
VACIOS	<b>3.85</b>	<b>%</b>	<b>3% - 5%</b>
VFA	<b>75.25</b>		

*Nota. El OAC se selecciona mediante el criterio de  $V_a = 4\%$  para la mezcla control.*

## 4.2 Resultados de briquetas con fibra

### 4.2.1 Resultados base: Gmb, Gmm y $V_a$ , por nivel de fibra

**Tabla 17:**  
*Resultados de briquetas con fibra (0,3%)*

<b>Variable</b>	<b>F0.3-01</b>	<b>F0.3-02</b>	<b>Promedio</b>
<b>Gmb (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>2,254</b>	<b>2,252</b>	<b>2,253</b>
<b>Gmm (Rice)</b>	<b>2,358</b>	<b>2,358</b>	<b>2,358</b>
<b><math>V_a</math> (%)</b>	<b>4,41</b>	<b>4,50</b>	<b>4,45</b>
<b>VMA (%)</b>	<b>15,90</b>	<b>15,97</b>	<b>15,93</b>
<b>VFA (%)</b>	<b>72,26</b>	<b>71,82</b>	<b>72,04</b>
<b>Flujo (0,01")</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>11,5</b>

Variable	F0.3-01	F0.3-02	Promedio
Lectura dial	350	370	360
K anillo	9,4283	9,4283	9,4283
Medida (kg) = K×Dial	3299,905	3488,471	3394,188
Factor de corrección (F.C)	0,93	1,00	—
Estabilidad corregida (kg)	3068,912	3488,471	3278,691

### Cálculos manuales (0,3%)

- **F0.3-01**

$$\text{Medida} = 9,4283 \times 350 = 3299,905$$

$$\text{Estabilidad corregida} = 3299,905 \times 0,93 = 3068,91165 \approx 3068,912$$

- **F0.3-02**

$$\text{Medida} = 9,4283 \times 370 = 3488,471$$

$$\text{Estabilidad corregida} = 3488,471 \times 1,00 = 3488,471$$

- **Promedio (estabilidad corregida)**

$$(3068,91165 + 3488,471) / 2 = 3278,691325 \approx 3278,691$$

**Tabla 18:**  
*Resultados de briquetas con fibra (0,4%)*

<b>Variable</b>	<b>F0.4-01</b>	<b>F0.4-02</b>	<b>Promedio</b>
<b>Gmb (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>2,244</b>	<b>2,246</b>	<b>2,245</b>
<b>Gmm (Rice)</b>	<b>2,357</b>	<b>2,357</b>	<b>2,357</b>
<b>Va (%)</b>	<b>4,79</b>	<b>4,71</b>	<b>4,75</b>
<b>VMA (%)</b>	<b>16,35</b>	<b>16,28</b>	<b>16,32</b>
<b>VFA (%)</b>	<b>70,71</b>	<b>71,07</b>	<b>70,89</b>
<b>Flujo (0,01")</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>13,5</b>
<b>Lectura dial</b>	<b>400</b>	<b>420</b>	<b>410</b>
<b>K anillo</b>	<b>9,4283</b>	<b>9,4283</b>	<b>9,4283</b>
<b>Medida (kg) = K×Dial</b>	<b>3865,603</b>	<b>3959,886</b>	<b>3912,745</b>
<b>Factor de corrección (F.C)</b>	<b>1,04</b>	<b>1,00</b>	<b>—</b>
<b>Estabilidad corregida (kg)</b>	<b>4020,227</b>	<b>3959,886</b>	<b>3990,057</b>

**Cálculos manuales (0,4%)**

- **F0.4-01**

$$\text{Medida} = 9,4283 \times 410 = 3865,603$$

$$\text{Estabilidad corregida} = 3865,603 \times 1,04 = 4020,22712 \approx 4020,227$$

- **F0.4-02**

$$\text{Medida} = 9,4283 \times 420 = 3959,886$$

$$\text{Estabilidad corregida} = 3959,886 \times 1,00 = 3959,886$$

- **Promedio (estabilidad corregida)**

$$(4020,22712 + 3959,886) / 2 = 3990,05656 \approx 3990,057$$

**Tabla 19:***Resultados de briquetas con fibra (0,5%)*

<b>Variable</b>	<b>F0.5-01</b>	<b>F0.5-02</b>	<b>Promedio</b>
<b>Gmb (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>2,232</b>	<b>2,232</b>	<b>2,232</b>
<b>Gmm (Rice)</b>	<b>2,354</b>	<b>2,354</b>	<b>2,354</b>
<b>Va (%)</b>	<b>5,18</b>	<b>5,18</b>	<b>5,18</b>
<b>VMA (%)</b>	<b>16,88</b>	<b>16,88</b>	<b>16,88</b>
<b>VFA (%)</b>	<b>69,32</b>	<b>69,32</b>	<b>69,32</b>
<b>Flujo (0,01")</b>	<b>16</b>	<b>20</b>	<b>18</b>
<b>Lectura dial</b>	<b>300</b>	<b>330</b>	<b>315</b>

Variable	F0.5-01	F0.5-02	Promedio
<b>K anillo</b>	<b>9,4283</b>	<b>9,4283</b>	<b>9,4283</b>
<b>Medida (kg) = K×Dial</b>	<b>2828,490</b>	<b>3111,339</b>	<b>2969,915</b>
<b>Factor de corrección (F.C)</b>	<b>1,04</b>	<b>1,00</b>	<b>—</b>
<b>Estabilidad corregida (kg)</b>	<b>2941,630</b>	<b>3111,339</b>	<b>3026,484</b>

#### Cálculos manuales (0,5%)

- **F0.5-01**

$$\text{Medida} = 9,4283 \times 300 = 2828,490$$

$$\text{Estabilidad corregida} = 2828,490 \times 1,04 = 2941,6296 \approx \mathbf{2941,630}$$

- **F0.5-02**

$$\text{Medida} = 9,4283 \times 330 = \mathbf{3111,339}$$

$$\text{Estabilidad corregida} = 3111,339 \times 1,00 = \mathbf{3111,339}$$

- **Promedio (estabilidad corregida)**

$$(2941,6296 + 3111,339) / 2 = 3026,4843 \approx \mathbf{3026,484}$$

#### 4.2.2 Resumen estadístico por tratamiento

**Tabla 20:**

*Resumen por porcentaje de fibra (promedio y  $\pm \Delta/2$ )*

% de fibra	Estabilidad corregida (lbf)	Flujo (0.01")	Va (%)	V.M.A. (%)	V.F.A. (%)	Gmb (g/cm <sup>3</sup> )	Gmm (g/cm <sup>3</sup> )
0	3657.4	13.3	4.03	15.63	74.2	2.254	2.349
0.3	3278.7 $\pm$ 209.8	11.5 $\pm$ 0.5	4.45	15.93 $\pm$ 0.02	72.04 $\pm$ 0.22	2.253 $\pm$ 0.001	2.358
0.4	3990.1 $\pm$ 30.2	13.5 $\pm$ 0.5	4.75 $\pm$ 0.4	16.32 $\pm$ 0.035	70.89 $\pm$ 0.18	2.245 $\pm$ 0.001	2.357
0.5	3026.5 $\pm$ 84.9	18 $\pm$ 2	5.18	16.88	69.32	2.232	2.354

*Nota. Valores reportados como promedio por tratamiento. Con dos réplicas, “ $\pm$ ” corresponde a (máx–mín)/2*

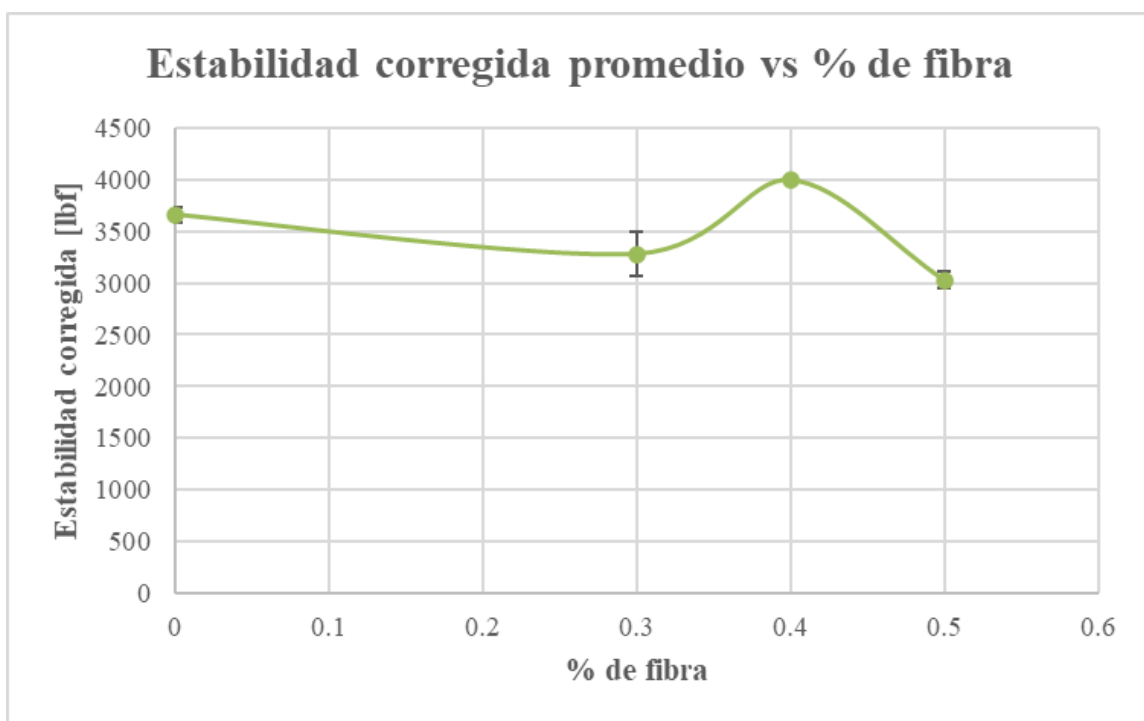
En la *Tabla 20* se observa que, al incrementar el contenido de fibra de 0.0% a 0.5%, el Va promedio aumenta de 4,03% (control) a 4,45% (0,3%), 4,75% (0,4%) y 5,18% (0,5%); en paralelo, el Flujo promedio pasa de 13,33 (control) a 11,50, 13,50 y 18,00 (0.01”). En cuanto a la estructura de vacíos del agregado, el VMA muestra una tendencia creciente, de 15,63% (control) a 15,93% (0,3%), 16,32% (0,4%) y 16,88% (0,5%), mientras que el VFA disminuye de 74,2% (control) a 72,04% (0,3%), 70,89% (0,4%) y 69,32% (0,5%). A su vez, la Gmb promedio presenta una disminución progresiva, de 2,254 a 2,232 g/cm<sup>3</sup>, mientras que la Gmm cambia levemente, de 2,349 a 2,354 g/cm<sup>3</sup>. En contraste, la Estabilidad corregida promedio no sigue una tendencia monotónica: pasa de 3657,4 (control) a 3278,7 (0,3%), alcanza un máximo en 0,4% (3990,1) y luego desciende en 0,5% (3026,5); además, la mayor dispersión entre réplicas se registra en 0,3% ( $\pm\Delta/2 \approx 209,8$ ), mientras que en 0,4% y 0,5% la dispersión es menor ( $\pm\Delta/2 \approx 30,2$  y 84,9, respectivamente).

#### 4.2.3 Gráficos de comparación

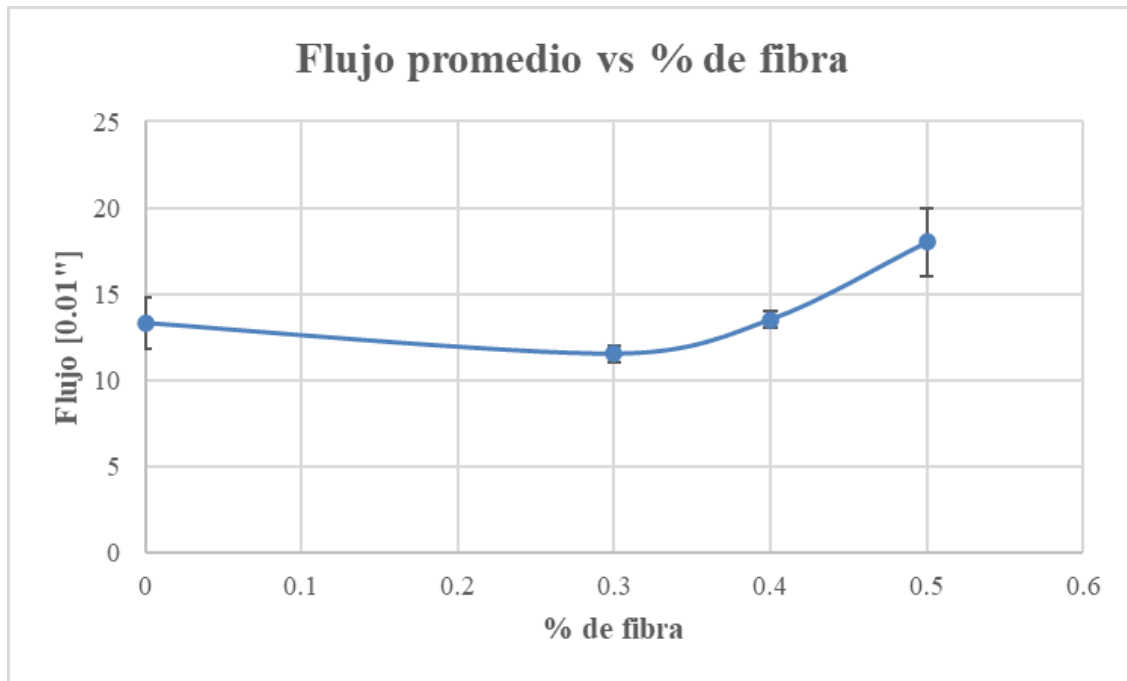
La Figura 34 y la Figura 35 confirman una tendencia clara: el Flujo y el Va aumentan conforme crece el porcentaje de fibra, observándose que el incremento del Flujo se vuelve más evidente a partir de 0.4% y alcanza su mayor valor en 0.5%, mientras que el Va muestra un

aumento progresivo a lo largo de todos los tratamientos. En la misma línea, la Figura 36 evidencia un incremento del VMA con el contenido de fibra, mientras que la Figura 37 muestra una disminución del VFA conforme aumenta la fibra, lo que refleja que una mayor proporción del volumen del agregado mineral queda disponible y una menor fracción de ese volumen corresponde a vacíos llenos con asfalto. De manera consistente con esa lectura, la Figura 38 evidencia que la  $G_{mb}$  decrece gradualmente con el incremento de fibra, con una disminución más marcada desde 0.4% hacia 0.5%, lo que es coherente con el mayor nivel de vacíos reportado por  $V_a$ . Finalmente, la Figura 33 muestra un comportamiento no lineal de la Estabilidad corregida, con un valor máximo en 0.4% y una reducción posterior en 0.5%, mientras que la Figura 39 indica que la  $G_{mm}$  varía levemente, con un incremento hasta 0.3% y una disminución gradual hacia 0.5%, lo que sugiere cambios pequeños en la gravedad específica máxima teórica frente a los cambios más marcados observados en vacíos y flujo.

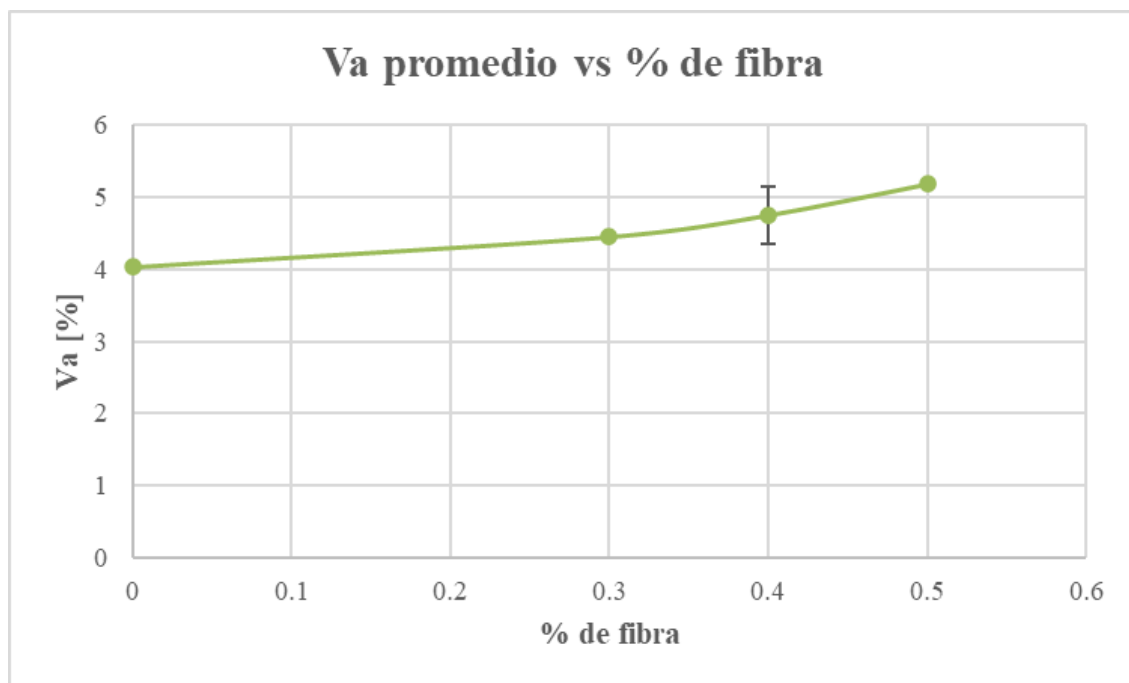
**Figura 33:**  
*Estabilidad corregida promedio vs % de fibra*

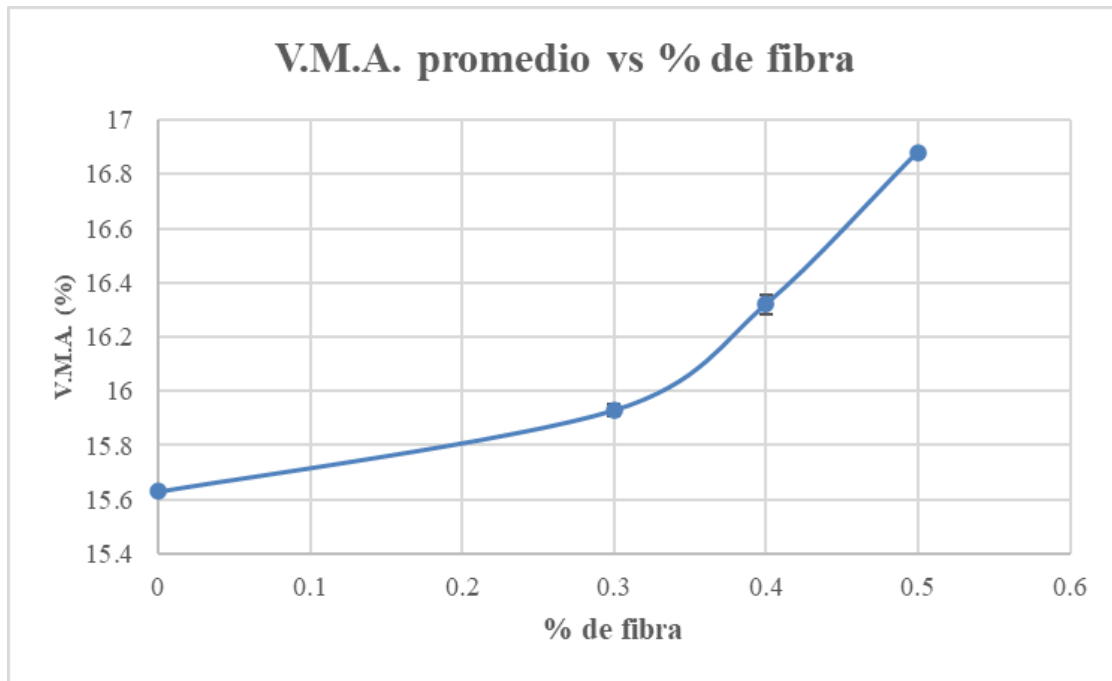
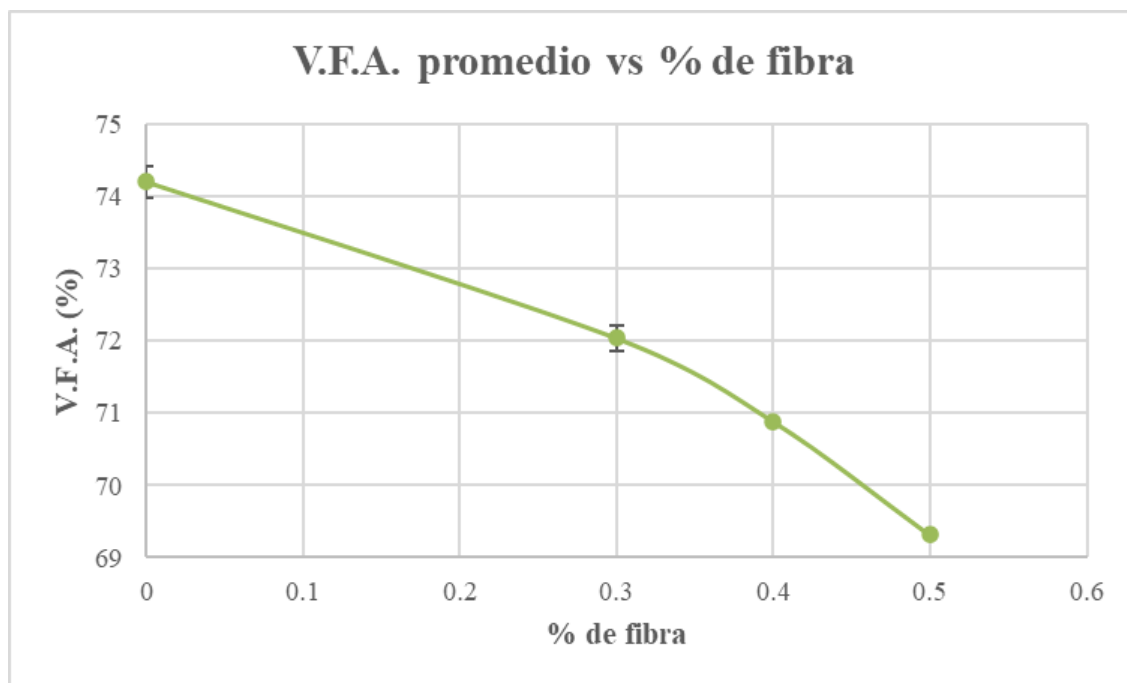


**Figura 34:**  
*Flujo promedio vs % de fibra*

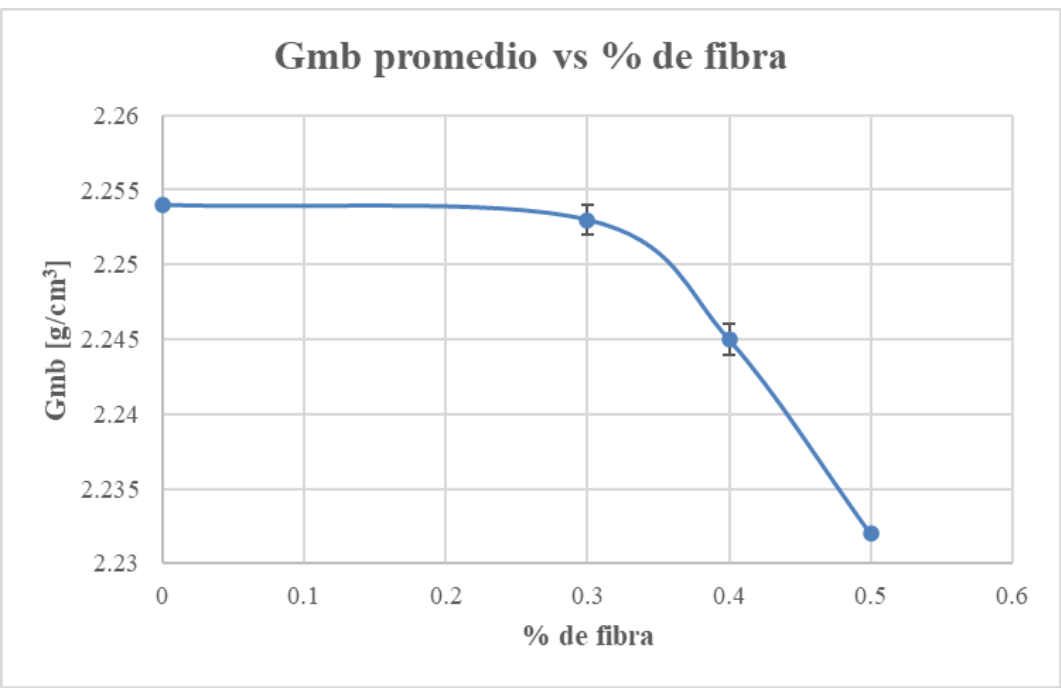


**Figura 35:**  
*Va promedio vs % de fibra*

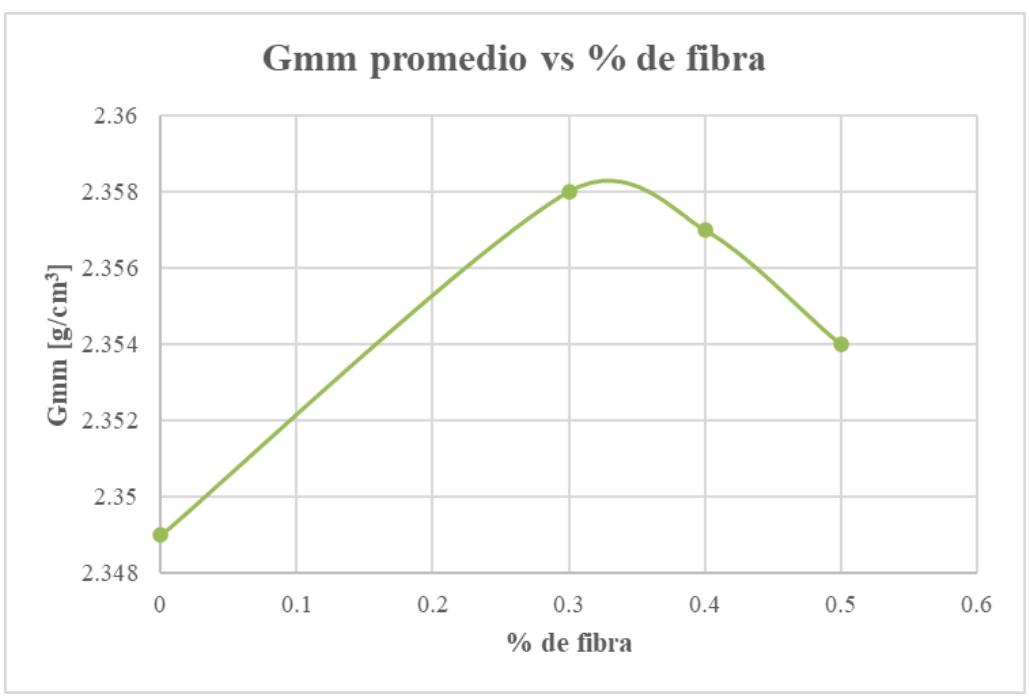


**Figura 36:***VMA promedio vs % de fibra***Figura 37:***VFA promedio vs % de fibra*

**Figura 38:**  
*Gmb promedio vs % de fibra*



**Figura 39:**  
*Gmm promedio vs % de fibra*



#### 4.2.4 Comparación directa contra la mezcla control

Con el fin de cuantificar el efecto de la fibra respecto a la mezcla base, se compararon los promedios por tratamiento frente al valor de referencia de la mezcla control al contenido de trabajo usado para fabricar las briquetas con fibra. Se reporta la diferencia absoluta  $\Delta$  y la variación porcentual  $\% \Delta$ , calculadas como:

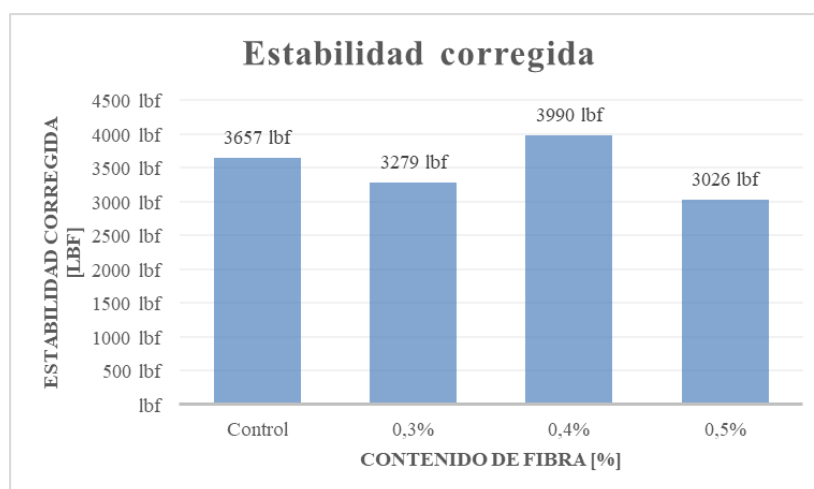
$$\Delta = X_{\text{fibra}} - X_{\text{control}} \qquad \% \Delta = \frac{X_{\text{fibra}} - X_{\text{control}}}{X_{\text{control}}} * 100$$

**Tabla 21:**  
*Comparación en estabilidad corregida (control vs fibra)*

Porcentajes	Estabilidad corregida	$\Delta = (\text{Fibra} - \text{Control})$	$\% \Delta$
Control	3657,000	—	—
0,3%	3278,691	-378,309	-10,35%
0,4%	3990,057	+333,057	+9,11%
0,5%	3026,484	-630,516	-17,24%

*Nota.*  $\Delta = (\text{tratamiento con fibra} - \text{control})$ .  $\% \Delta = (\Delta / \text{control}) \times 100$ .

**Figura 40:**  
*Histograma de comparación de Estabilidad*



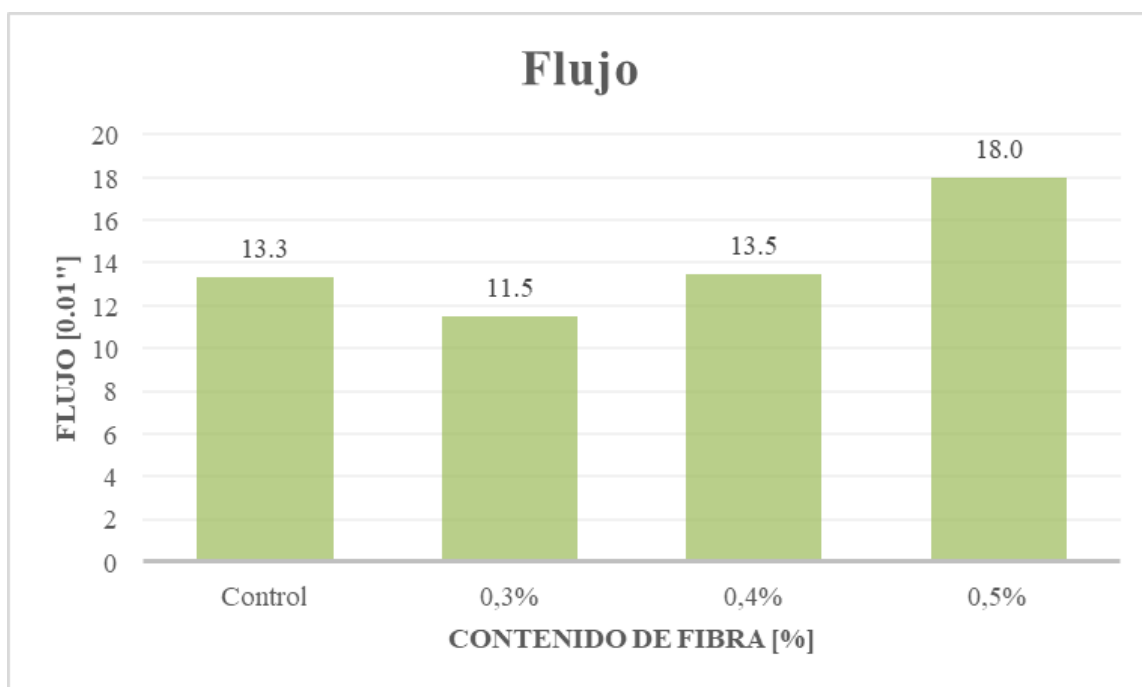
*Nota.* Elaboración propia. Comparación de promedios entre control y tratamientos con fibra; los valores de  $\Delta$  y  $\% \Delta$  se reportan en las Tablas 21–25.

**Tabla 22:**  
Comparación en flujo (control vs fibra)

Porcentajes	Flujo	$\Delta = (\text{Fibra} - \text{Control})$	$\% \Delta$
Control	13,33	—	—
0,3%	11,5	-1,5	-11,54%
0,4%	13,5	+0,5	+3,85%
0,5%	18,0	+5,0	+38,46%

Nota.  $\Delta = (\text{tratamiento con fibra} - \text{control})$ .  $\% \Delta = (\Delta / \text{control}) \times 100$ .

**Figura 41:**  
Histograma de comparación de Flujo



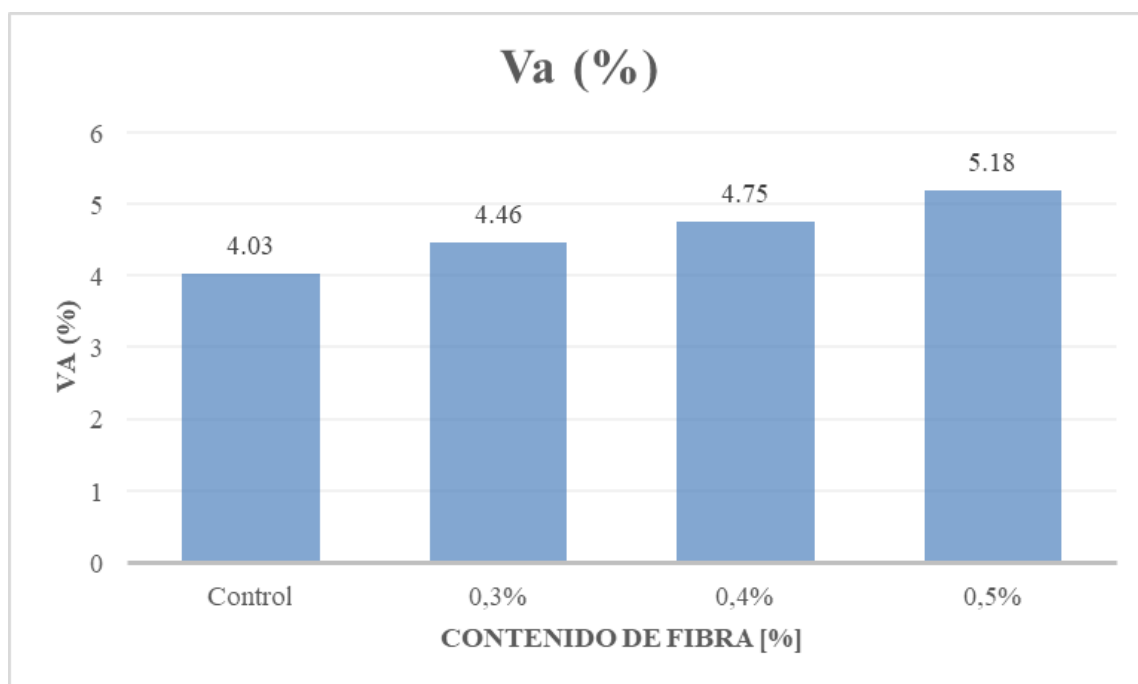
Nota. Elaboración propia. Comparación de promedios entre control y tratamientos con fibra; los valores de  $\Delta$  y  $\% \Delta$  se reportan en las Tablas 21–25.

**Tabla 23:**  
Comparación en  $V_a$  (control vs fibra)

Porcentajes	$V_a$ (%)	$\Delta$ (%)	$\% \Delta$
<b>Control</b>	4,03	—	—
<b>0,3%</b>	4,46	+0,43	+10,55%
<b>0,4%</b>	4,75	+0,72	+17,87%
<b>0,5%</b>	5,18	+1,15	+28,54%

Nota.  $\Delta = (\text{tratamiento con fibra} - \text{control})$ .  $\% \Delta = (\Delta / \text{control}) \times 100$ .

**Figura 42:**  
Histograma de comparación de  $V_a$



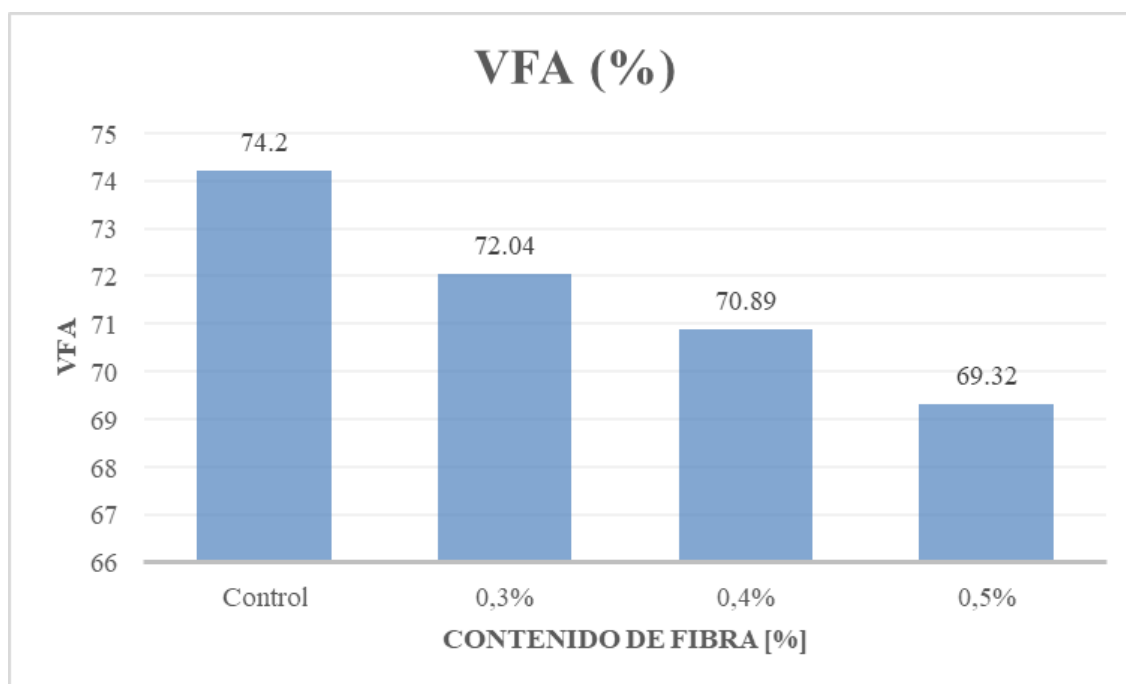
Nota. Elaboración propia. Comparación de promedios entre control y tratamientos con fibra; los valores de  $\Delta$  y  $\% \Delta$  se reportan en las Tablas 21–25.

**Tabla 24:**  
Comparación en VMA (control vs fibra)

Porcentajes	VMA (%)	$\Delta$ (%)	$\% \Delta$
<b>Control</b>	15,63	—	—
<b>0,3%</b>	15,93	+0,30	+1,92%
<b>0,4%</b>	16,32	+0,69	+4,41%
<b>0,5%</b>	16,88	+1,25	+8,00%

Nota.  $\Delta = (\text{tratamiento con fibra} - \text{control})$ .  $\% \Delta = (\Delta / \text{control}) \times 100$ .

**Figura 43:**  
Histograma de comparación de VMA



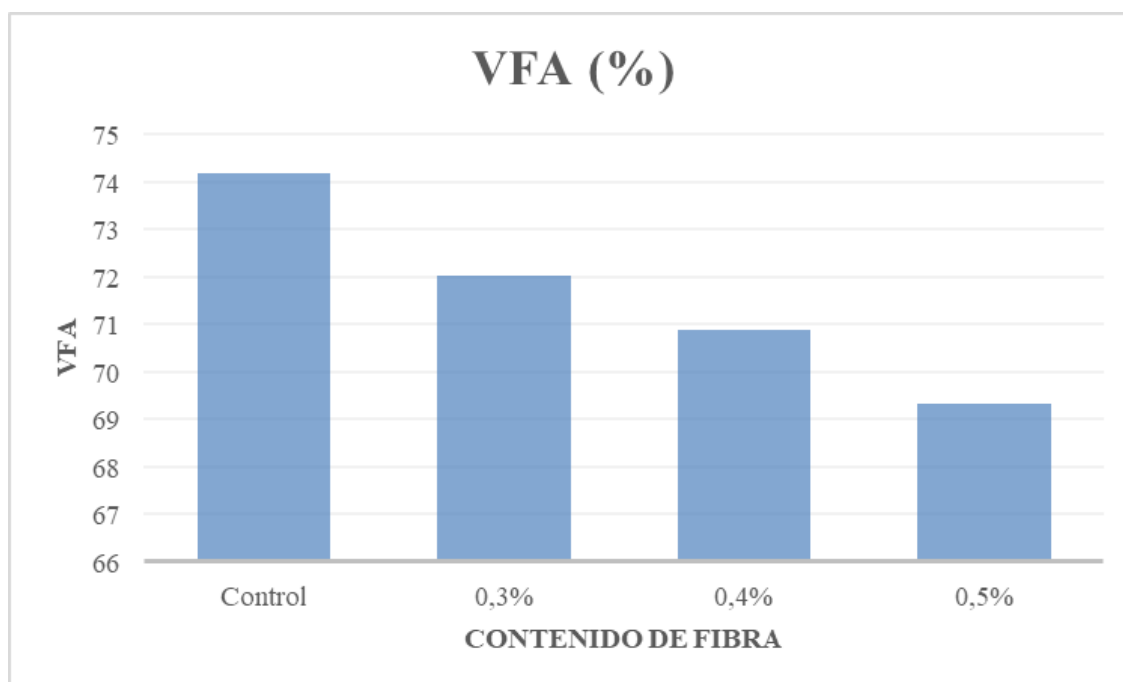
Nota. Elaboración propia. Comparación de promedios entre control y tratamientos con fibra; los valores de  $\Delta$  y  $\% \Delta$  se reportan en las Tablas 21–25.

**Tabla 25:**  
Comparación en VFA (control vs fibra)

Porcentajes	VFA (%)	$\Delta$ (%)	$\% \Delta$
<b>Control</b>	74,20	—	—
<b>0,3%</b>	72,04	-2,16	-2.91%
<b>0,4%</b>	70,89	-3,31	-4.46%
<b>0,5%</b>	69,32	-4,88	-6.58%

Nota.  $\Delta = (\text{tratamiento con fibra} - \text{control})$ .  $\% \Delta = (\Delta / \text{control}) \times 100$ .

**Figura 44:**  
Histograma de comparación de VFA



Nota. Elaboración propia. Comparación de promedios entre control y tratamientos con fibra; los valores de  $\Delta$  y  $\% \Delta$  se reportan en las Tablas 21–25.

### 4.3 Síntesis

- La mezcla control permitió definir el contenido de trabajo (OAC adoptado) y establecer la línea base para comparar desempeño Marshall y parámetros volumétricos.
- Se evaluaron mezclas con fibra de pseudotallo de plátano de 0,3%, 0,4% y 0,5%, con dos briquetas por nivel.
- En el comportamiento volumétrico, el  $V_a$  aumentó respecto al control (4,03%) hasta 4,45% (0,3%), 4,75% (0,4%) y 5,18% (0,5%), mientras que la  $G_{mb}$  presentó una reducción progresiva de 2,254 (control) a 2,253, 2,245 y 2,232 g/cm<sup>3</sup>.
- El VMA incrementó de 15,63% (control) a 15,93%, 16,32% y 16,88%, mientras que el VFA disminuyó de 74,2% a 72,04%, 70,89% y 69,32%, respectivamente.
- La  $G_{mm}$  (Rice) mostró variaciones leves entre tratamientos: 2,349 (control), 2,358 (0,3%), 2,357 (0,4%) y 2,354 g/cm<sup>3</sup> (0,5%).
- La estabilidad corregida evidenció un efecto dependiente del contenido de fibra: 3657,4 (control), 3278,7 (0,3%), 3990,1 (0,4%) y 3026,5 (0,5%); el flujo varió de 13,33 (control) a 11,50, 13,50 y 18,00 (0,01"), respectivamente.

## CAPÍTULO V: Conclusiones y recomendaciones

### 5.1 Conclusiones

- La gravedad específica máxima teórica (Gmm) presentó variaciones leves entre tratamientos (2,349 g/cm<sup>3</sup> en control; 2,358 g/cm<sup>3</sup> en 0,3%; 2,357 g/cm<sup>3</sup> en 0,4%; 2,354 g/cm<sup>3</sup> en 0,5%), mientras que la gravedad específica bulk (Gmb) mostró una reducción progresiva (2,254 g/cm<sup>3</sup> en control; 2,253 g/cm<sup>3</sup> en 0,3%; 2,245 g/cm<sup>3</sup> en 0,4%; 2,232 g/cm<sup>3</sup> en 0,5%), evidenciando una menor densificación con el aumento de fibra.
- Los parámetros volumétricos de vacíos (Va), vacíos en el agregado mineral (VMA) y vacíos llenos de asfalto (VFA) se modificaron de manera sistemática al incrementar la fibra. El porcentaje de Va aumentó de 4,03% (control) a 4,45% (0,3%), 4,75% (0,4%) y 5,18% (0,5%); el porcentaje de VMA aumentó de 15,63% a 15,93%, 16,32% y 16,88%; y el porcentaje de VFA disminuyó de 74,2% a 72,04%, 70,89% y 69,32%, respectivamente, lo que indica un sistema progresivamente más abierto conforme aumenta la fibra.
- La respuesta Marshall mostró un efecto dependiente del contenido de fibra. La Estabilidad corregida no fue monotónica: 3657,4 lb (control), 3278,7 lb (0,3%), 3990,1 lb (0,4%) y 3026,5 lb (0,5%), con el máximo en 0,4%. El Flujo varió de 13,33 (control) a 11,50 (0,3%), 13,50 (0,4%) y 18,00 (0,5%) (todos expresados en 0,01”) mostrando un incremento marcado en 0,5%.
- Frente a la mezcla control, el 0,3% redujo la estabilidad (-10,35%) y el 0,5% la redujo aún más (-17,24%), mientras que el 0,4% la incrementó (+9,11%). En paralelo, el Va aumentó en todos los tratamientos (tendencia creciente con el porcentaje de fibra), y el flujo se

mantuvo cercano al control en 0,4%, pero aumentó de forma marcada en 0,5%, evidenciando un cambio notable de deformabilidad en ese nivel. }

- Al contrastar Va y Flujo con los rangos usuales para capa de rodadura en criterios Marshall (Va objetivo en torno a 3–5% y flujo), los tratamientos 0,3% y 0,4% se mantienen dentro del comportamiento esperado por estar cercanos al Va objetivo y con flujo comparable al control, mientras que 0,5% presenta Va por encima de 5% y flujo significativamente mayor, por lo que resulta el tratamiento menos conveniente si se prioriza controlar vacíos y deformabilidad.
- Dentro del rango evaluado, el 0,4% de fibra presentó el mejor balance, al alcanzar la mayor estabilidad corregida (3990,1 lb) con un flujo (13,50) prácticamente igual al control (13,33). Aunque el Va aumentó de 4,03% a 4,75% y la Gmb disminuyó de 2,254 g/cm<sup>3</sup> a 2,245 g/cm<sup>3</sup>, el comportamiento se mantuvo cercano al rango objetivo de vacíos y evitó el aumento crítico de deformabilidad observado en 0,5%. Por ello, esta dosificación se presenta como una alternativa eficiente; además, por tratarse de un residuo agrícola, su uso es potencialmente sostenible y podría contribuir a disminuir la susceptibilidad al fisuramiento por fatiga al favorecer un mejor equilibrio entre estabilidad y deformabilidad.

En conjunto, la incorporación de fibra de pseudotallo de plátano modificó simultáneamente la volumetría y la respuesta Marshall de la mezcla respecto a la mezcla control: aumentó Va (y VMA) y redujo Gmb, mientras que la estabilidad mostró un máximo en 0,4% y el flujo aumentó de forma crítica en 0,5%. Dado que el fisuramiento por fatiga se asocia a un balance volumétrico–resistente, el aumento de vacíos y el incremento del flujo observados hacia 0,5% sugieren una condición menos favorable desde esa perspectiva, mientras que 0,4% concentra el mejor

compromiso dentro del rango evaluado, proporcionando mayor estabilidad con flujo cercano al control, aunque con  $V_a$  superior al control.

## 5.2 Recomendaciones

- Adoptar el 0,4% de fibra como dosificación de referencia dentro del rango evaluado, por presentar el mejor compromiso entre mayor estabilidad y flujo comparable al control, evitando el comportamiento desfavorable observado en 0,5%.
- Limitar el uso de 0,5% de fibra en capa de rodadura bajo las condiciones estudiadas, debido al incremento de  $V_a$  por encima del rango objetivo y al aumento marcado del flujo, asociados a una mezcla más abierta y con mayor deformabilidad.
- Incorporar como variables de estudio la longitud de fibra y el método de incorporación, para determinar su influencia en compactabilidad ( $G_{mb}/V_a$ ) y en estabilidad/flujo.
- Caracterizar propiedades físicas de la fibra relevantes al comportamiento observado (por ejemplo, absorción, humedad, morfología) y correlacionarlas con los cambios de  $V_a$ , VMA, VFA y Marshall.
- Comparar el desempeño con otros tipos de fibras naturales (o combinaciones) bajo la misma mezcla base y el mismo procedimiento Marshall, para identificar si el patrón observado es específico del pseudotallo o responde a un mecanismo común de fibras vegetales.
- Complementar el análisis con ensayos de desempeño vinculados a fisuramiento por fatiga (por ejemplo, resistencia a tracción indirecta ITS o parámetros mecanicistas compatibles), para sustentar con medición directa la relación entre el balance volumétrico–resistente y la susceptibilidad al fisuramiento.

### Referencias bibliográficas

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2008). *AASHTO T 245-97 (2008): Standard Method of Test for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus*. AASHTO.

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2012). *AASHTO T 209-12: Standard Method of Test for Theoretical Maximum Specific Gravity (Gmm) and Density of Hot Mix Asphalt (HMA)*. AASTHO. [https://matest.ru/uploads/standards/AASHTO\\_T209-12.pdf](https://matest.ru/uploads/standards/AASHTO_T209-12.pdf)

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2013). *Bulk specific gravity (Gmb) of compacted hot mix asphalt (HMA) using saturated surface-dry specimens (AASHTO T 166-13)*. AASHTO. [https://matest.ru/uploads/standards/AASHTO\\_T166-13.pdf](https://matest.ru/uploads/standards/AASHTO_T166-13.pdf)

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2025). *Materials Book 45th Edition (July 2025) – Master Table of Contents*. American Association of State Highway and Transportation Officials. <https://store.transportation.org/Common/DownloadContentFiles?id=2546>

Asphalt Institute. (2014). *MS-2: Asphalt Mix Design Methods (7th ed.)*. <https://doi.org/AsphaltInstitute>

ASTM Internacional. (2019). *Standard test method for bulk specific gravity and density of non-absorptive compacted asphalt mixtures (ASTM D2726/D2726M-19)*. ASTM Internacional. <https://www.ccil.com/wp-content/uploads/2020/04/ASTM-D2726-D2726M-19-Aug-2019.pdf>

ASTM Internacional. (2022). *ASTM D6927/D6927M-22: Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures*. ASTM Internacional. <https://doluongvietnam.vn/uploads/files/D%206927%20-%2022.pdf>

ASTM International. (2019). *ASTM C136/C136M-19 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. ASTM International: [https://store.astm.org/c0136\\_c0136m-19.html](https://store.astm.org/c0136_c0136m-19.html)

ASTM International. (2019). *Standard test method for theoretical maximum specific gravity and density of asphalt mixtures (ASTM D2041/D2041M-19)*. ASTM International. <https://www.ccil.com/wp-content/uploads/2020/04/ASTM-D2041-D2041M-19-Aug-2019.pdf>

California Department of Transportation. (2022). *Highway Design Manual: Chapter 600 – Pavement Engineering*. California Department of Transportation. <https://dot.ca.gov/-/media/dot-media/programs/design/documents/chp0600-a11y.pdf>

Empresa Pública Petroecuador. (2016). *Estadísticas cemento asfalto grado de viscosidad AC-20 (Norma NTE INEN 2515-2010) [Coordinación General de Control de Calidad, Refinería Esmeraldas]*. Empresa Pública Petroecuador.

Empresa Pública Vialmin-EP. (2025). *Especificaciones técnicas: “Etapa de precalificación para adquisición de hormigones hidráulicos y asfálticos...” (PREC-VIALMINEP-2025-004)*. Empresa Pública Vialmin-EP. [https://www.vialminep.gob.ec/wp-content/uploads/2025/10/Especificaciones\\_Tecnicas\\_Hormigones\\_Hidraulicos\\_Asfalticos-signed-signed.pdf](https://www.vialminep.gob.ec/wp-content/uploads/2025/10/Especificaciones_Tecnicas_Hormigones_Hidraulicos_Asfalticos-signed-signed.pdf)

- Federal Highway Administration. (s.f.). *Kiln Dust – Asphalt Concrete (User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction, FHWA-RD-97-148)*. Federal Highway Administration: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/kd2.cfm>
- Ferreira da Costa, L., Brasileiro, D., de Oliveira Sousa, I. L., y Leite, L. D. (2020). Asphalt mixture reinforced with banana fibres. *Road Materials and Pavement Design*, 22(8), 1881-1893. <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1713866>
- Guo, M., Zhang, Y., y Liu, J. (2023). The latest progress in the application of fibers in asphalt pavement: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 390. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131754>
- Hui, Y., Wu, S., Mo, L., y Wang, D. (2022). Recent advances in basalt fiber reinforced asphalt mixture for pavement applications. *Materials*, 15(19). <https://doi.org/10.3390/ma15196826>
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador. (2025). *Especificaciones técnicas de los rubros especiales*. Ministerio de Transporte y Obras Públicas. [https://www.mit.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2025/04/BPC\\_3\\_6\\_Especificaciones\\_Tecnicas\\_de\\_los\\_Rubros\\_Especiales.pdf](https://www.mit.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2025/04/BPC_3_6_Especificaciones_Tecnicas_de_los_Rubros_Especiales.pdf)
- National Asphalt Pavement Association; Federal Highway Administration. (2001). *HMA Pavement Mix Type Selection Guide (IS 128)*. NAPA / FHWA. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/asphalt/HMA.pdf>

SABITA. (2021). *Manual 35: Design and Use of Asphalt in Road Pavements (TRH 8)*. SABITA.

<https://www.sabita.co.za/wp-content/uploads/2021/02/sabita-asphalt-manual-35-trh8-2021-latest.pdf>

SABITA. (2024). *Sabita Manual 35: Design and Use of Asphalt in Road Pavements (7th ed.)*.

SABITA. <https://www.sabita.co.za/wp-content/uploads/2024/10/sabita-manual-35-updated-3-oct-2024-1.pdf>

Sharma, A., Choudhary, R., Kumar, A., y Dash, S. (2025). A state-of-the-art review of mineral, synthetic, and natural fiber applications in asphalt mixes. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*.

Targeted Overlay Pavement Solutions. (2022). *Stone Matrix Asphalt How-To Document*. TOPS; FHWA.

[https://www.fhwa.dot.gov/pavement/tops/pubs/TOPS\\_SMA\\_How\\_To\\_Report\\_508.pdf](https://www.fhwa.dot.gov/pavement/tops/pubs/TOPS_SMA_How_To_Report_508.pdf)

Tobias, J., Flintsch, G. W., Pike, A., y Lottenberg, R. (2023). *Pavement Friction for Road Safety Primer*. Federal Highway Administration (FHWA), U.S. Department of Transportation.

<https://highways.dot.gov/sites/fhwa.dot.gov/files/2023-06/FHWA%20Pavement%20Friction%20for%20Road%20Safety%20Primer.pdf>

Venkatesh, U., y Suvvari, S. (2018). An Experimental Investigation on Stone Matrix Asphalt by Using Coconut and Banana Fibers. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9, 964-973. An Experimental Investigation on Stone Matrix Asphalt by Using Coconut and Banana Fibers

Washington Asphalt Quality Tracking Committee. (2024). *FOP Library WAQTC FOP AASHTO T 84 (22): Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate (FOP for AASHTO T 84)*.

Washington Asphalt Quality Tracking Committee (WAQTC). [https://www.waqtc.org/wp-content/uploads/2024/09/other\\_t84.pdf](https://www.waqtc.org/wp-content/uploads/2024/09/other_t84.pdf)

Washington State Department of Transportation. (2026). *T 85 – Materials Manual M 46-01.48: Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate (FOP for AASHTO T 85 (25))*. Washington State Department of Transportation. <https://wsdot.wa.gov/publications/manuals/fulltext/M46-01/t85.pdf>

Wisconsin Asphalt Pavement Association. (2020). *2020 Asphalt Pavement Design Guide*. WAPA. [https://www.wispave.org/wp-content/uploads/dlm\\_uploads/WAPA-Design-Guide-2020-Final.pdf](https://www.wispave.org/wp-content/uploads/dlm_uploads/WAPA-Design-Guide-2020-Final.pdf)